INVESTIGACION y CIENCIA

BUSQUEDA INACABADA DEL ORIGEN DE LA VIDA

CAOS CEREBRAL

EL REINO DE LA MATERIA Y SU LINAJE DE PARTICULAS

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN



ARQUITECTURA POR ORDENADOR

ABRIL 1991
600 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa



Abril de 1991 Número 175

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Ramón Pascual: *El número de familias de la materia*; J. M. García de la Mora: *Fisiología de la percepción*; Rodolfo Miranda: *Microscopios de rayos X*; Joandomènec Ros: *El equidna*; Luis Bou: *Computación y arquitectura* y *Juegos matemáticos*; Andrés Lewin: *La acústica del clavicémbalo*; Santiago Torres: *En el principio...*; J. Vilardell: *Hace...*

Ciencia y sociedad:

Manuel Puigcerver, Josep E. Llebot y Joandomènec Ros

Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver

Libros:

Luis Mas, Marià Alemany, Luis Alonso, Esteban Rodríguez Ocaña y David Jou.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
7	Miguel Beato
8-18	Magda Mària y Miguel Beato
21-28	Ian Worpole
30-31	Walter J. Freeman, Peter Broadwell
32	Carol Donner
33	Dana Burns-Pizer
34	Dana Burns-Pizer (*arriba*), Walter J. Freeman (*abajo*)
35	Dana Burns-Pizer
36-37	Walter J. Freeman
53	Erik Anderson, Dieter Kern
54	Gabor Kiss
55	J. Gilbert, J. Pine, Ch. Buckley (*arriba, izq.*), P. Guttman (*arriba, centro*), P. C. Cheng, O. C. Wells (*arriba, dcha.*), Ch. Jacobsen, M. R. Howells, S. S. Rothman (*abajo*)
56	C. Buckley, Y. Ali (*arriba*), K. Goncz, S. S. Rothman (*abajo*)
57	H. Ade, J. Kirz, E. Johnson, S. Hulbert, E. Anderson, D. Kern
58	Radiomicroscopistas de las Univ. de Göttingen y Aquisgrán (*izq.*), King's College (*dcha.*)
61-62	M. McKelvey, P. D. Rismiller
63-64	Patricia J. Wynne
65	R. W. Semon (*izq.*), M. McKelvey, P. D. Rismiller (*dcha.*)
66	M. McKelvey, P. D. Rismiller
68-69	Ch. Gwathmey (*izq.*), D. P. Greenberg (*arriba, centro*), K. Howie, B. Trumbore, D. P. Greenberg (*abajo, centro*), Gwathmey Siegel & Ass. Architects (*dcha.*)
70	Donald P. Greenberg
71	K. Howie, B. Trumbore (*arriba, dcha.*), J. Wallace, E. Chen, M. Cohen (*abajo, dcha.*)
72-73	K. Howie, P. Boudreau, E. Haines, J. Wallace (*arriba izq., abajo*), G. Kiss (*arriba, centro*), E. Chen, S. I. Feldman, J. O'Brien (*arriba, dcha.*)
75	Museo Metropolitano de Arte, Colección Crosby
76-77	Hank Iken
78-79	Kenneth D. Marshall (*arriba*), Hank Iken (*abajo*)
80-81	George Retseck
82	Kevin Walsh
83	Jason Küffer, basado en un dibujo de Andrew Scott
84	J. William Schopf, Chip Clark
85	Robert D. Ballard
86	Siebert Heuser
88	Chip Clark, David Deamer
89	Dale T. Anderson
92	David Phillips



LA PORTADA muestra una representación por ordenador de la capilla de Ronchamps, famosa creación arquitectónica de Le Corbousier. La imagen se construyó a partir de un modelo informático tridimensional del edificio, ensamblado por Paul Boudreau y Keith Howie, en Ithaca. Las nuevas estaciones de trabajo gráfico permiten generar versiones un poco más sencillas de estas imágenes (sin los rayos de luz) a razón de varios fotogramas por segundo (véase "Computación y arquitectura", por Donald P. Greenberg, en este mismo número).

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal Garfella
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48 Telefax 419 47 82

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Alan Hall, *Executive Editor*; Michelle Press, *Managing Editor*; Timothy M. Beardsley; Elizabeth Corcoran; Deborah Erickson; Marguerite Holloway; John Horgan; Philip Morrison, *Book Editor*; Corey S. Powell; John Rennie; Philip E. Ross; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen, Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.
ADVERTISING DIRECTOR Robert F. Gregory
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª
08029 Barcelona (España)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	6600	12.000
Extranjero	7300	13.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 600 pesetas
Extraordinario: 775 pesetas

— Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.
— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.
— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. 652 42 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

PUBLICIDAD

Madrid: Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 409 70 45 - Fax 409 70 46
Cataluña: Marcel Klein
M. K. Publicidad
Ortigosa, 14-16, 3º, D. 20
08003 Barcelona Tel. 268 45 05 - Fax 268 16 07

OJD DIFUSION PUBLICIDAD

ISSN 0210-136X Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Tecfa. Línea Fotomecánica, Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de la Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

...*cincuenta años*

Scientific American: "Hace varios años, el Consejo Universal para la Investigación Psíquica fijó una recompensa de 10.000 dólares para el medium que fuera capaz de producir un efecto de espiritismo, o cualquier manifestación de esa naturaleza, que su presidente, Dunninger, no pueda reproducir o explicar científicamente. A esta recompensa, aún vigente, Scientific American añade ahora un incentivo extra de 5000 dólares."

"Gracias al lenguaje, la tradición y la escritura, pueden transmitirse a las generaciones presentes y futuras las experiencias de las generaciones pasadas. Así, cada generación puede recibir los conocimientos acumulados en el pasado. Somos, en ese sentido, herederos de todas las edades. Nuestros conocimientos crecen; pero, ¿aumenta nuestra capacidad intelectual? ¿Superan las mejores mentes actuales a las de Sócrates, Platón y Aristóteles?"

"En el Sol, las colisiones entre núcleos atómicos causan la transformación gradual del hidrógeno en helio, generando la energía que aquéllos emiten. Tales colisiones atómicas deberían ser más numerosas dentro de una enana blanca, en proporción a la densidad. Para la misma temperatura interna, cabe esperar que se produzca miles de veces más calor que en el Sol; sin embargo, el calor que realmente se produce no puede ser mayor que el que emite la estrella, que es menos que un uno por ciento del que despide el Sol. Hay una discrepancia de 1.000.000 a uno, o más. El único modo de explicarlo parece ser la hipótesis de que los átomos que, merced a sus reacciones, generan calor en el seno del Sol, abundan muchísimo menos en las enanas blancas."

"El descubrimiento de que es posible arrancar sonidos musicales al cobre y luego anularlo martilleando el material hace pensar en una pista que apunta hacia la causa de por qué unos materiales son duros y otros son blandos. El doctor Thomas A. Read, becario investigador de Westinghouse, informó de este descubrimiento ante la Sociedad Americana de Física. Demostró su hallazgo golpeando suavemente una barra de cobre moldeada a partir de metal licuado. Obtuvo así un sonido tan nítido como el de un diapasón, pero tras comprimirla en una prensa, o tan sólo dejándola caer sobre una mesa, la barra respondía sólo con un sordo 'clong' al golpearla levemente con un martillo. Sin embargo, cuando después esa misma barra martilleaba o trabajaba en frío a fondo, recuperaba la musicalidad perdida. Si bien no hay nadie todavía que sepa de cierto por qué el metal pierde su cualidad musical y luego la recobra, el doctor Read afirma que la explicación más plausible es que los átomos de cobre dislocados sofoquen el sonido musical."

...*cien años*

Scientific American: "Para construir y armar un buque de guerra moderno, tardamos en años los meses de antes. Resulta, pues un desatino que hablemos de crear una armada cuando se presente un caso de emergencia. Si es que a la postre hemos de tener una armada, hagámonos con una capaz de vapulear al enemigo en combate y sirva de escuela de oficios mecánicos de la mejor calidad en tiempos de paz."

"¿Obedecemos fatalmente a una ley natural como la formulada en las Escrituras: 'Polvo eres y en polvo te convertirás'? El doctor Variot, uno de los médicos más ilustres de los hospitales parisienses, responde a esa pregunta proponiendo a sus coetáneos el uso de procesos electrometalúrgicos para obtener momias indestructibles. El doctor metalizará por completo nuestro cadáver, cubriéndolo de una envoltura de bronce, cobre, níquel, plata u oro, según el capricho o la riqueza de quienes nos sobrevivan. Mas para el inventor del proceso, éste es, en sí solo, una cuestión secundaria. El propósito de sus investigaciones es, sobre todo, proporcionar a los museos y laboratorios de nuestras facultades de medicina unos especímenes muy exactos y fidedignos, que no salvar nuestros restos mortales de la voracidad de los gusanos."

"Se ha presentado en Londres hace poco un procedimiento para extraer dientes sin dolor. Se trata de un dispositivo eléctrico formado por un par de pilas de bicromato potásico y un carrete de Ruhmkorff a los que está unido un conmutador de la máxima sensibilidad. El paciente sujeta con las manos las asas de la batería. Una de estas asas está conectada al polo negativo. El polo positivo está dividido en dos partes, una de las cuales está conectada al asa y de la otra sale un cable que está atornillado al mango de la tenaza extractora. Cuando el paciente agarra con fuerza las asas, se hace subir gradualmente la intensidad de la corriente hasta que el paciente ya no puede aguantar más; entonces, mientras se introducen las tenazas, la corriente se corta durante un segundo y vuelve a darse. '¿Le dolió?', le preguntó nuestro representante al paciente cuando le mostraron las raíces de la bicúspide. 'Nada de nada'."

Interacción entre proteínas reguladoras y ADN

El ADN contiene un plan codificado que determina la expresión espacio-temporal del programa genético y, por tanto, el desarrollo del organismo, a través de su interaccción con proteínas reguladoras

Miguel Beato

El descubrimiento de la estructura general del ácido desoxirribonucleico (ADN) y el desciframiento del código genético en los años cincuenta marcan el comienzo de una nueva época en la comprensión de los procesos biológicos. Desde entonces sabemos que la estructura de nuestras proteínas, y por consiguiente nuestro fenotipo, está determinada genéticamente por la secuencia lineal de nucleótidos en una parte del ADN nuclear. Con los años, y debido al vertiginoso desarrollo de las técnicas de ingeniería genética, se ha logrado descifrar la estructura primaria —la secuencia lineal de bases— de un gran número de genes; la información de los bancos genéticos continúa creciendo a una velocidad casi exponencial. Aun cuando los 50 millones de nucleótidos secuenciados hasta hoy sólo representan una fracción mínima de la información genética de la biosfera, su estudio permite ya entrever las reglas generales que rigen el almacenamiento y la expresión de los programas genéticos.

En animales superiores, que constan de un elevado número de células dotadas de núcleo y estructuradas en tejidos y órganos distintos, sólo una fracción relativamente pequeña de la información genética contenida en el ADN nuclear determina ("codifica") directamente la estructura de las proteínas y el ARN. Se desconoce la función que cumple la mayor parte del ADN nuclear, aunque sí se sabe que en él se halla contenida la información necesaria para la expresión coordinada, en el tiempo y el espacio, del programa genético característico de cada organismo. Sin la existencia de esta información reguladora, resultaría inexplicable el desarrollo de un organismo pluricelular complejo a partir de un huevo fecundado. Uno de los desafíos más acuciantes y difíciles que tiene ante sí la biología molecular es, precisamente, el de esclarecer los mecanismos moleculares responsables de la expresión coordinada de la información genética durante el desarrollo embrionario y en el organismo adulto.

MIGUEL BEATO es profesor de biología molecular en el Instituto de Biología Molecular e Investigación Tumoral adscrito a la Universidad de Marburgo. Se doctoró en 1967 por la Universidad de Göttingen. Su área de interés se centra en los mecanismos moleculares de la regulación génica. Desde el año 1984 ocupa su cargo actual.

Los estudios realizados con la mosca *Drosophila melanogaster* y con el nemátodo *Caenorhabditis elegans* han demostrado que el desarrollo embrionario y el proceso de morfogénesis están coordinados secuencialmente por una compleja red de interacciones entre genes reguladores. Estos genes se activan o reprimen en el curso de una serie de decisiones en cascada iniciadas con la fecundación del óvulo y la división del núcleo celular. Durante cada división celular en este período tienen lugar decisiones binarias relativas a la expresión o represión de ciertos genes maestros ("master genes"), cuyos productos condicionan, a su vez, la lectura de la información genética. Procesos análogos ocurren durante el desarrollo de organismos superiores, aun cuando los datos disponibles en este terreno se limiten básicamente al ratón.

De este modo, al cabo de múltiples divisiones celulares, cada célula del organismo adulto está caracterizada por una dotación peculiar de proteínas transreguladoras, que determinan las partes del programa genético expresadas en cada célula. (El neologismo "transregulador" indica que estas proteínas actúan en "trans", sobre genes que no se hallan necesariamente en continuidad lineal con el gen regulador.) Así, por ejemplo, el producto del gen maestro *MyoD1* está capacitado para convertir fibroblastos (células del tejido conjuntivo) en mioblastos (células musculares) mediante la activación de la expresión de un nuevo programa genético característico del tejido muscular. Durante el desarrollo embrionario y en el organismo adulto, el patrón de expresión genética no es completamente fijo e invariable, sino que cada célula es capaz de responder a estímulos y señales procedentes de otras células o del exterior con modificaciones en el patrón de su expresión genética. Sólo así se explica una parte considerable de la homeostasis y de la adaptación a las condiciones cambiantes del medio ambiente.

De esta breve introducción se desprende que con el ADN del óvulo y del espermatozoide se hereda no sólo la información estructural relativa a las macromoléculas que forman la identidad del organismo, sino también el plan y el programa necesarios para su desarrollo a partir del huevo fecundado. La correcta realización del programa genético es posible porque ciertas macromoléculas, los productos de los genes maestros, son proteínas transreguladoras, con capacidad para descubrir y desarrollar la información reguladora contenida en la estructura del ADN. No se trata de ninguna tarea trivial. El genoma de una célula animal, de mamífero por ejemplo, consta de más de mil millones de símbolos o letras (correspondientes a los cuatro nucleótidos

adenina, timina, guanina y citosina), organizados en millones de "palabras", cada una con un promedio de cinco o seis símbolos (cortas secuencias de nucleótidos).

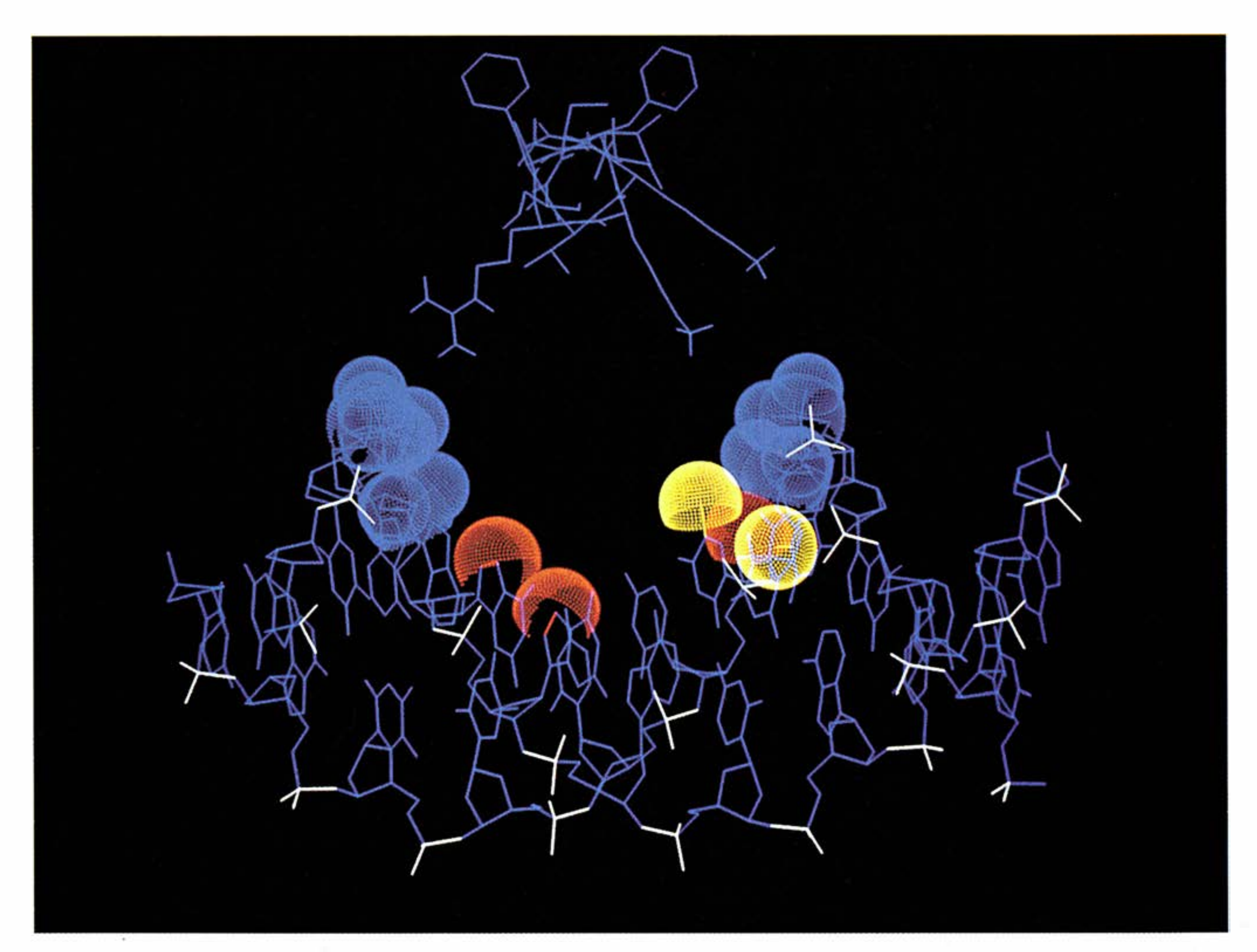
La analogía con el lenguaje, muy sugestiva, ha llevado a Edward Trifonov, del Instituto Weizmann de Israel, a redactar un diccionario genético, *gnomic*, basado en la utilización de métodos lingüísticos. Junto a un gran número de las palabras clave descritas ya por los biólogos moleculares, *gnomic* incluye también palabras posibles derivadas del análisis lingüístico del ADN cuyo significado no se ha descifrado todavía experimentalmente.

En lo que sigue, trataré de pasar breve revista al estado actual de nuestros conocimientos sobre los mecanismos moleculares en virtud de los cuales las proteínas transreguladoras reconocen las palabras clave contenidas en el ADN de células animales y las emplean para dirigir la expresión coordinada de la información genética.

Los primeros indicios sobre el particular se obtuvieron en el curso de los trabajos sobre inducción enzimática en la bacteria *Escherichia coli* realizados a comienzos de los años sesenta. En una serie de experimentos con el operón *lac*, originales y elegantes, que definieron el marco de un nuevo paradigma de la regulación genética todavía vigente, François Jacob y Jacques Monod, del Instituto Pasteur de París, desarrollaron el concepto de regulación por represor, una proteína que mantendría inactivo el operón. (Llámase operón a la unidad genética que contiene la información para la expresión regulada de determinadas enzimas; el de la lactosa, operón *lac*, determina tres enzimas requeridas para el metabolismo de ese azúcar.) El represor se fijaría al operador, corta secuencia de nucleótidos en la vecindad del promotor, y bloquearía así la transcripción de los genes estructurales del operón. La función del inductor, lactosa o sus análogos sintéticos, sería la de inhibir la actividad del represor mediante su fijación al mismo, lo que conllevaría un cambio conformacional de éste.

Sólo unos años después, Walter Gilbert y Beno Müller-Hill, de la Universidad de Harvard, aislaron el represor *lac* y demostraron que, en ausencia del inductor, presenta una gran afinidad por el ADN del operador (una de las palabras clave), mientras que después de ligar el inductor su afinidad por el operador disminuye drásticamente.

Posteriormente, Marc Ptashne, también de la Universidad de Harvard, caracterizó una proteína transreguladora análoga que reprime la expresión de los genes estructurales del bacteriófago *lambda* y mantiene así el estado lisogénico silencioso del genoma vírico mediante su interacción con otras palabras clave del ADN. De esa forma quedaba claramente demostrada la capacidad de ciertas proteínas procariónticas de fijarse selectivamente a secuencias específicas del ADN y controlar, por tanto, la expresión génica.



1. REPRESENTACION GRAFICA de la secuencia TGTCCT correspondiente a la mitad derecha del palindromo reconocido por el receptor de glucocorticoides. El ADN se muestra en azul y los grupos fosfatos en blanco. Las esferas punteadas son las de van der Waals de los átomos contactados por el receptor: en azul, las de los grupos fosfato, en rojo las de los grupos N-7 de las guaninas y en amarillo las de los grupos 5'-CH_3 de las timinas.

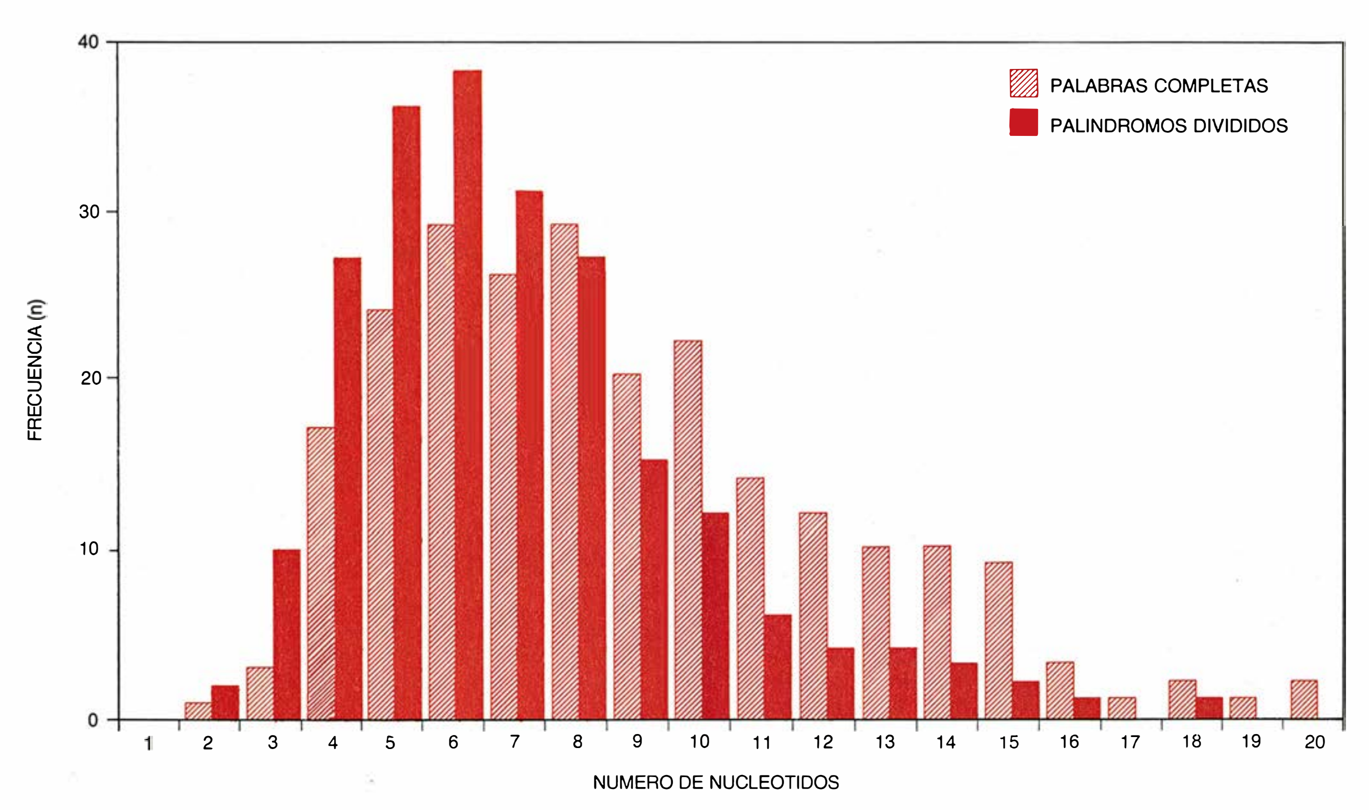
Se demostró, más tarde, que tanto la regulación del operón *lac*, como la del bacteriófago *lambda*, eran más complejas de lo que se pensara en un principio: requerían la participación de otras proteínas transreguladoras con un efecto positivo sobre la expresión de la información genética. Fueron así descubriéndose un elevado número de sistemas procariontes regulados por la interacción entre proteínas transreguladoras y secuencias específicas del ADN. (Aquí sólo aludiré a tales sistemas procariontes —bacterias y bacteriófagos— de manera incidental.)

La introducción de las poderosas técnicas de ingeniería genética posibilitó el estudio de los aspectos moleculares de la regulación génica en células de animales; el nivel de resolución de este análisis es similar al alcanzado en células procariontes. Por razones didácticas, abordaremos el estado de la cuestión siguiendo un orden definido. Empezaré por describir la estructura general y las propiedades de las secuencias del ADN (las "palabras clave" de la información genética) que son reconocidas por las proteínas transreguladoras. Resumiré, luego, los aspectos estructurales de dichas proteínas y trataré de reunirlas en grupos o familias. En tercer lugar, dedicaré algunas líneas al examen del mecanismo molecular de la interacción entre las proteínas y el ADN y veremos por qué son capaces de descifrar la información contenida en dichas palabras clave. Por último, utilizando como ejemplo la regulación génica por hormonas esteroideas, describiré la complejidad que rodea la activación y la represión de la transcripción en cada caso concreto.

Comencemos, pues, por las palabras clave del lenguaje genético. A lo largo de los últimos diez años se ha ido describiendo un buen número de secuencias de nucleótidos del ADN de células animales que son reconocidas selectivamente por las distintas proteínas reguladoras o factores de transcripción. La comparación de la estructura general de estas palabras clave permite deducir algunas características comunes. Con respecto a su *longitud* puede decirse que, aun cuando es bastante variable, oscila entre 3 y 18 caracteres o símbolos (nucleótidos) por palabra. El análisis de la frecuencia de las distintas longitudes revela una distribución compleja con un máximo alrededor de 6 y varios hombros en torno a 8, 10 y 13-14.

Si se consideran en detalle las palabras más largas, se descubre que a menudo tienen una estructura en palíndromo (término tomado prestado de la lingüística, donde designa la palabra o frase que se lee igual de izquierda a derecha que en sentido inverso sin cambiar su significado) y constan de dos mitades más o menos simétricas. Por consiguiente, esta población puede desdoblarse en dos palabras semejantes y cortas. Tras esta corrección, la longitud de las palabras clave muestra una distribución más homogénea, con un máximo entre 5 y 6 símbolos. Es decir, las palabras clave están constituidas por un número relativamente pequeño de símbolos. Esta conclusión, obtenida de los datos experimentales, confirma la predicción del análisis lingüístico de Trifonov y Brendel, que también arroja una longitud óptima de 5 a 6 nucleótidos, si se eliminan los tripletes característicos del código genético (que determinan la secuencia de aminoácidos en las proteínas) y las secuencias reconocidas por enzimas de restricción. Significa ello que la información contenida en una secuencia de cinco o seis nucleótidos, sobre todo si se repite en forma de palíndromo, parece ser suficiente para ser reconocida selectivamente por las proteínas reguladoras. Volveré sobre esto al exponer los mecanismos de reconocimiento y discriminación de secuencias.

Cuando las palabras clave tienen una estructura palindrómica simétrica, los centros de simetría de las dos



2. DISTRIBUCION DE PALABRAS REGULADORAS, o palabras "clave", de acuerdo con su longitud, es decir, con el número de nucleótidos de que constan. La ilustración se ha realizado con un conjunto de 250 palabras clave. Las barras rayadas denotan el número de nucleótidos que componen dichos términos; las rojas, la distribución de palabras clave después de dividir en dos mitades las palabras con estructura palindrómica.

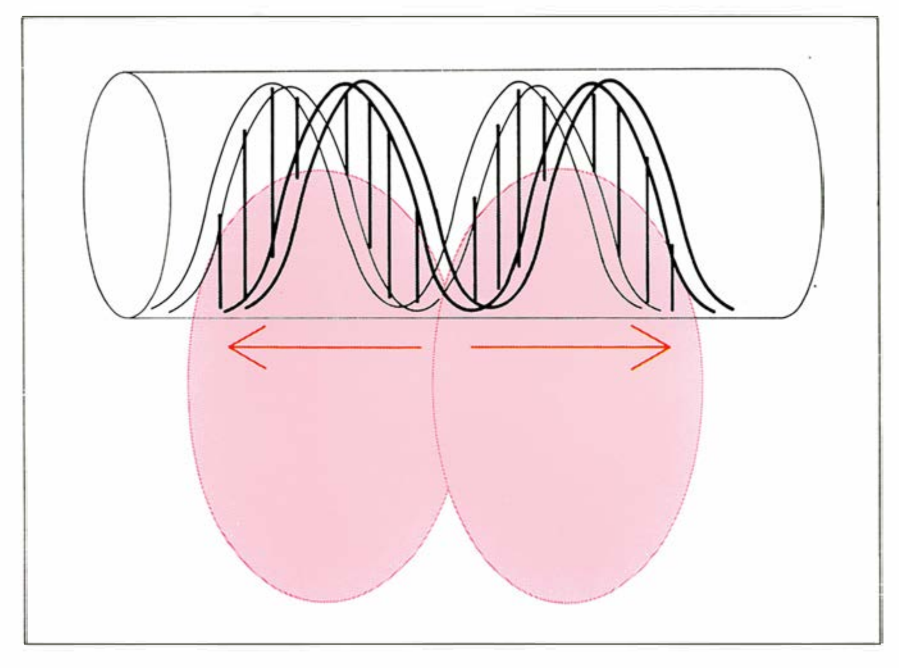
mitades del palíndromo suelen estar separados por unos 10 pares de bases; se hallarían, pues, orientados hacia la misma cara de una doble hélice de ADN en la forma B (configuración topológica más común de ADN que se distingue, entre otras cosas, por poseer las bases muy cerca del eje de la hélice, cuya periodicidad es aproximadamente 10 pares de bases). Esta y otras observaciones que comentaré más adelante sugieren que la estructura secundaria del ADN en la región de las palabras clave constituye la doble hélice clásica de Watson y Crick. Lo cual no quiere decir que, en algunos casos especiales, la estructura del ADN no pueda adoptar conformaciones distintas que desempeñen un papel en el mecanismo de reconocimiento. Pero no parece ser ésa la regla, sino la excepción.

¿Cuál es la estructura general de las proteínas reguladoras? El hecho de que las palabras clave tengan a menudo una estructura simétrica invertida sugiere que las proteínas reguladoras interaccionan con dichas secuencias en forma de dímeros. Se ha confirmado esta hipótesis en múltiples casos, y se ha comprobado que la homodimerización (unión de dos monómeros iguales) estabiliza la fijación de cada monómero a las secuencias palindrómicas. La dimerización requiere que los dos monómeros se unan a la misma cara del ADN, lo que explica la orientación de los palíndromos con las dos mitades separadas por una vuelta de la doble hélice. Se ha observado a menudo que, si se modifica artificialmente la orientación angular de las dos mitades del palíndromo, eliminando o introduciendo una sola base en el centro de simetría, se reduce drásticamente la afinidad de las proteínas reguladoras por el ADN.

Las proteínas reguladoras constan, en general, de varias regiones o dominios que difieren en su estructura y función. El recurso a la ingeniería genética ha permitido identificar las regiones responsables de la fijación al ADN; se trata, así se ha visto, de regiones bastante pequeñas de la proteína, cuya longitud no llega al centenar de aminoácidos. La cristalización conseguida de algunas proteínas ha facilitado conocer, con gran precisión, su estructura espacial. En varios casos se ha podido obtener cristales que incluyen la proteína y el ADN al que se fija; se conoce, pues, la estructura del complejo formado por la proteína y el ADN.

La comparación de las secuencias disponibles permite la clasificación de las proteínas reguladoras en varios grupos o familias de acuerdo con la estructura general de la región que interactúa con el ADN. Sea la estructura *hélice-vuelta-hélice*. Fue ésta la primera que se descubrió estudiando las proteínas procariónticas con afinidad para secuencias específicas de ADN; consta de dos pequeñas hélices *alfa* de carácter anfipático (esto es, con parte polar y parte hidrofóbica), hélices separadas por una corta vuelta de pocos aminoácidos. Hallada en un principio en el receptor *cro* del bacteriófago *lambda* y en la proteína receptora de AMP cíclico de *E. coli*, se descubrió luego en muchas proteínas procariónticas y eucariónticas. Las eucariónticas abarcan proteínas homeóticas que controlan el desarrollo embrionario de insectos, anfibios y mamíferos e incluyen también una serie de factores de transcripción ampliamente distribuidos por la escala animal. En todos estos casos, una de las dos hélices actúa de cabeza lectora entrando en contacto directo con el ADN de doble cadena a través del surco mayor, mientras que la segunda hélice sirve para mantener la hélice lectora en la posición correcta.

Una estructura similar, compuesta también por dos hélices *alfa* anfipáticas aunque separadas por un bucle ("loop") en vez de vuelta, se ha descubierto recientemente en un grupo heterogéneo de proteínas reguladoras de eucariontes. Este grupo comprende proteínas implicadas en la diferenciación del tejido muscular, *MyoD* y miogenina, proteínas que participan en la neurogénesis de insectos (verbigracia, *achete-scute* y *daughterless*), oncogenes (así, la familia de *myc*) y proteínas que se fijan al reforzador ("enhancer") de las inmunoglobulinas. Aun cuando no se dispone todavía de la estructura espacial, todo parece indicar que las dos hélices anfipáticas de estas proteínas cumplen la misma función que en las proteínas provistas de la estructura hélice-vuelta-hélice, aunque no se excluye una participación directa en la homodimerización.

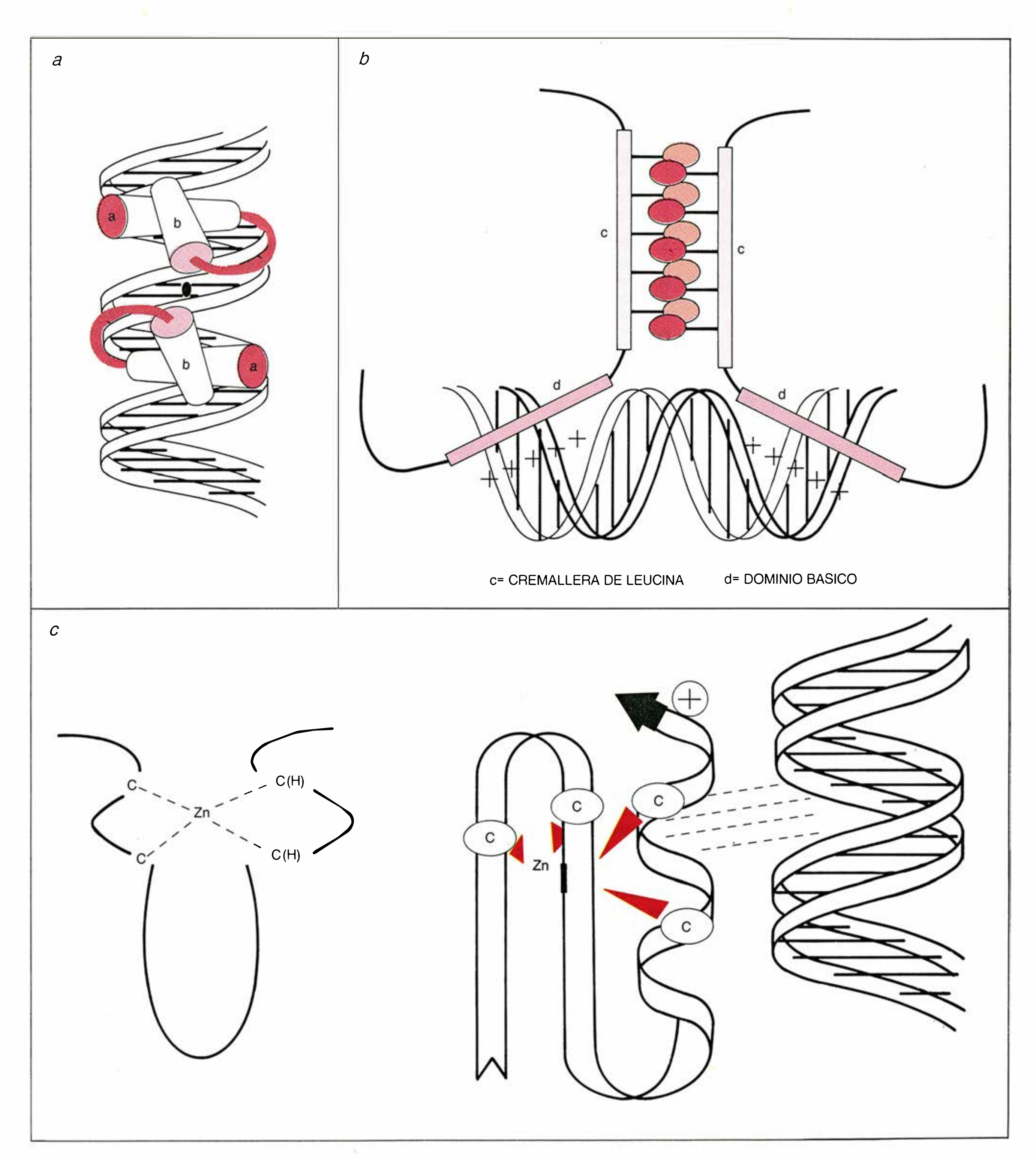


3. HOMODIMERO DE PROTEINA unido a una palabra palindrómica. Se aporta un esquema general del reconocimiento de palabras palindrómicas en el ácido desoxirribonuleico de doble cadena por homodímeros de proteínas transreguladoras. El tubo cilíndrico corresponde a un fragmento de ADN de doble cadena en la forma B estándar, con la posición de las dos mitades de una palabra palindrómica indicadas por las flechas de sentido opuesto. Los centros de ambas mitades están separados por 10 pares de bases y se encuentran, por consiguiente, en la misma cara de la doble hélice. Cada una de las dos mitades del palíndromo es reconocida por un monómero de la proteína transreguladora, facilitando de esa manera su interacción y la formación de un homodímero.

Un grupo de proteínas eucariónticas, cuyo número crece por días, utiliza, para trabar contacto con el ADN, una estructura distinta de la anterior. Los miembros de ese grupo se fijan al ADN en forma de dímeros que interaccionan íntimamente mediante una cremallera de leucina ("leucine zipper"). La estructura, denominada *cremallera de leucina-región básica*, se estabiliza por la interacción hidrofóbica de las cadenas laterales de leucinas que se repiten en la secuencia lineal de cada siete aminoácidos; se hallan, por tanto, orientadas hacia el mismo lado en una hélice *alfa*. (Se llama así la configura-

ción helicoidal de muchas proteínas arrollada a derechas con una periodicidad de 3 a 4 aminoácidos por vuelta.) En la inmediata vecindad de la cremallera de leucina se encuentran una serie de aminoácidos básicos que son los que entrarían en contacto directo con el ADN. Se desconoce cuál sea la estructura espacial exacta de la región; se ha descubierto en múltiples proteínas reguladoras, entre ellas oncogenes (*myc, jun* y *fos*) y proteínas transreguladoras (GCN4 de levadura y C/EBP de animales).

Pero quizá la familia más numerosa de proteínas reguladoras sea la constituida por las que presentan un dominio de fijación al ADN estructurado en forma de *dedos de zinc* ("zinc fingers"). En un comienzo se atribuyó ese motivo estructural al factor de transcripción TFIIIA de *Xenopus laevis*; más tarde se observó en muchas proteínas reguladoras. La estructura general consta de un ion de zinc coordinado tetraédricamente con dos pares de cisteínas (C2/C2) o con un par de cisteínas y un par de histidinas (C2/H2). A esta clase pertenecen también factores de transcripción clásicos (Sp1), proteínas implicadas en la embriogénesis de *Drosophila*, como *krüpple* y *tailless*, y proteínas reguladoras de la transcripción, así los receptores de las hormonas esteroideas. El número de copias del motivo, es



decir, el número de dedos de zinc, varía bastante de unas proteínas a otras, desde un solo dedo en el oncogén E1A de adenovirus hasta 30 dedos en la proteína determinante del sexo de *Drosophila*.

Gracias al empleo de la técnica de resonancia magnética nuclear en dos dimensiones se ha podido deducir la estructura espacial de varios dedos de zinc. Hoy podemos concluir ya que la función principal de los mismos consiste en estabilizar una estructura que permite un contacto de una hélice *alfa* anfipática situada en la base del dedo de zinc con el surco mayor del ADN en forma B. Se han observado también dedos de zinc en proteínas que no se fijan al ADN, la quinasa C es un ejemplo, de donde se infiere que esa estructura puede cumplir múltiples funciones a tenor del contexto.

En general, las proteínas reguladoras forman parte de distintas familias y los miembros de una familia comparten la estructura de los dominios fijadores al ADN y, por consiguiente, reconocen secuencias semejantes de nucleótidos. Se han descrito recientemente proteínas reguladoras que poseen una combinación de los motivos estructurales reseñados. En ese contexto, hay proteínas que contienen una cremallera de leucina y, además, dedos de zinc, o dominios homeo con estructura hélice-vuelta-hélice. Descubrimientos que abonan la posibilidad de que se den interacciones entre proteínas pertenecientes a distintas familias mediante la formación de heterodímeros, un fenó-

4. MOTIVOS ESTRUCTURALES de los dominios fijadores de ADN en proteínas transreguladoras. A la izquierda, arriba, se representa la estructura hélice-vuelta-hélice, con las hélices *alfa* indicadas por cilindros. Se muestran dos monómeros de los dominios fijadores al ADN con el centro de simetría antedicho. La hélice *a* "lee" la secuencia del ADN, mientras que la *b* sirve para mantener la hélice *a* en su posición correcta. Una estructura semejante, aunque con un bucle en vez de vuelta entre hélices *alfa*, caracteriza a otra subfamilia de proteínas transreguladoras. Para ilustrar la cremallera de leucina, dibujamos un dímero del dominio fijador a ADN en el que los dos monómeros están ligados por una interacción entre cadenas laterales de las leucinas. Los dominios básicos de ambos monómeros, que recuerdan por su forma las hojas de una tijera, interactúan con el surco mayor de la doble cadena de ADN. Por último, los dedos de zinc. El esquema superior nos dibuja uno con dos pares de cisteínas (C) o un par de cisteínas y otro de histidinas (H) que ligan tetraédricamente un ion del metal. Abajo, podemos apreciar una estructura secundaria de la cadena polipeptídica con una hélice *alfa* en la raíz del dedo de zinc en interacción con el surco mayor del ADN.

meno del que se conocen varios ejemplos según veremos. De ese modo se amplía exponencialmente la gama de posibilidades reguladoras y se multiplica el número de posibles secuencias reguladoras.

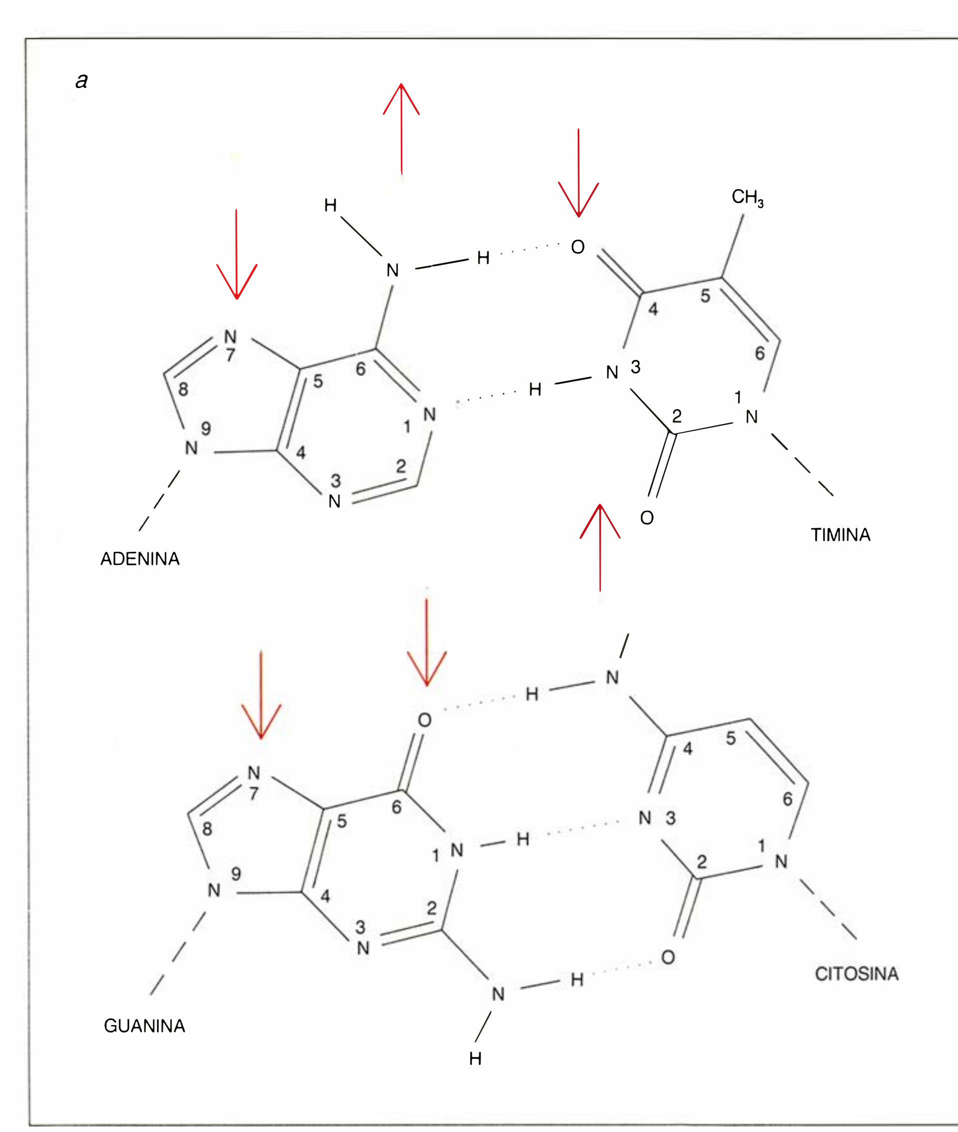
Antes de cerrar este apartado dedicado a la estructura general de las proteínas reguladoras, es necesario aludir a un grupo heterogéneo de ellas que no se encuadran en ninguna de las clases citadas. Mencionaré, por ejemplo, el factor de transcripción TFIID, que reconoce la secuencia TATA ("TATA box"), común a la mayoría de los promotores transcritos por la enzima ARN polimerasa II; ese factor no ofrece, en su región responsable de la fijación al ADN, ninguna semejanza con los motivos descritos. Tampoco el factor nuclear I, proteína de la familia implicada en la replicación del ADN de adenovirus y en la regulación de un número muy alto de promotores, tiene en su región fijadora de ADN ninguna homología con los motivos que conocemos en otras proteínas. En general, sin embargo, todas las proteínas que interactúan con el surco mayor de la doble hélice del ADN presentan una región capaz de formar una hélice *alfa* de carácter anfipático, la llamada hélice de reconocimiento. Lo que sugiere que se trata de una estructura idónea para el reconocimiento de la secuencia de nucleótidos en el ADN de doble cadena.

Vengamos ahora al mecanismo de discriminación. La verdad es que no se sabe con exactitud en virtud de qué mecanismo molecular las proteínas reguladoras reconocen la secuencia nucleotídica del ADN. Todo parece indicar que en el proceso intervienen dos tipos de interacciones, específicas e inespecíficas, cuya importancia relativa varía considerablemente. Llámase fijación específica a la que ocurre entre determinadas bases de la secuencia de ADN y cadenas asimismo determinadas de aminoácidos, mientras que la interacción inespecífica no depende de la secuencia de ADN y suele afectar al esqueleto de la doble cadena, el fosfato y la desoxirribosa. La interacción inespecífica, que puede incluir enlaces iónicos y puentes de hidrógeno, contribuye a la energía libre de la reacción; por su parte, la interacción específica permite que las proteínas reguladoras reconozcan, entre las distintas secuencias de ADN, aquellas que deben actuar como dianas e iniciar procesos reguladores.

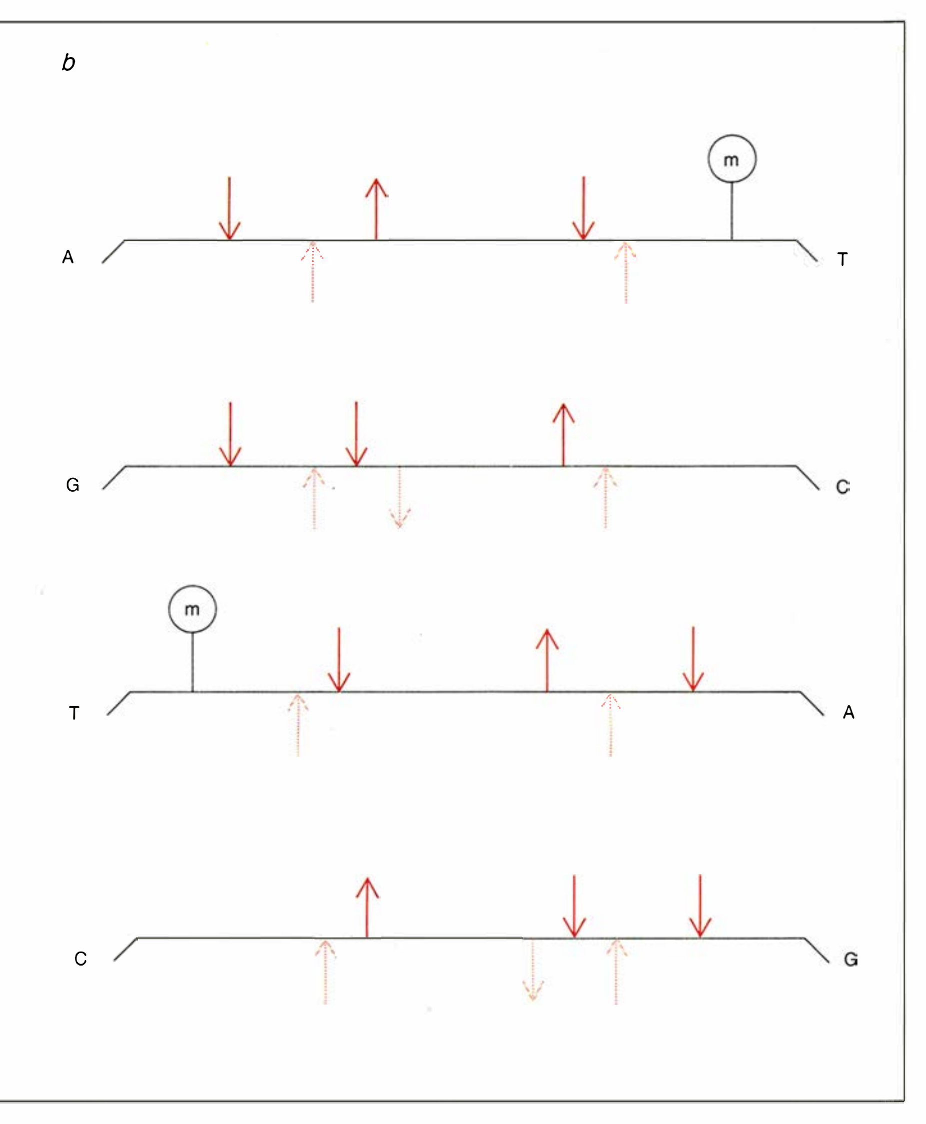
Cabe, en principio, la posibilidad de que la secuencia de nucleótidos determine variaciones mínimas de la estructura secundaria de la doble hélice y que tales variaciones sean advertidas por proteínas reguladoras a través de interacciones exclusivas con el esqueleto "deformado" de la doble hélice. Este tipo de lectura indirecta de la secuencia del ADN a través de la deformación de la doble hélice ha sido postulado por Paul Sigler, de la Universidad de Chicago, para el reconocimiento del operador *trp* por el represor de triptófano de *E. coli*. Sin embargo, no se ha corroborado todavía la validez de esa hipótesis.

La mayoría de las proteínas reguladoras establecen contacto con el ADN vía el surco mayor de la doble hélice. El ADN de doble cadena contiene cuatro unidades de información, que son los cuatro pares de bases A-T, T-A, G-C y C-G, que se reconocen, a través del surco mayor, por la orientación de sus grupos donadores o aceptores de puentes de hidrógeno y por la posición del grupo metilo de la timina. Cada par de bases puede formar tres enlaces de hidrógeno con distinta localización y direccionalidad. Expuesto a grandes rasgos, un par G-C tiene la estructura aceptor-aceptor-donador; un par C-G constituye su imagen especular: donador-aceptor-aceptor; los pares A-T y T-A tienen, ambos, la ordenación aceptor-donador-aceptor, pero un par A-T se distingue de otro T-A por la posición exacta de los grupos implicados en puentes de hidrógeno y por la posición extrema del grupo metilo de la timina.

Por consiguiente, cada par de bases es perfectamente reconocible a través del surco mayor, sin necesidad de romper los enlaces que mantienen firme la estructura en doble cadena del



5. LOS CUATRO PARES DE BASES DEL ADN con sus donadores y aceptores de puentes de hidrógeno. A la izquierda se ofrece la estructura de un par adenina-timina y de un par guanina-citosina con los grupos capaces de establecer puentes de hidrógeno en el surco mayor del ADN; los donadores



están indicados por una flecha que apunta lejos del grupo correspondiente y, por una flecha que señala en sentido contrario, los aceptores. A la derecha, los cuatro pares de bases de acuerdo con los puentes de hidrógeno; se incluyen el surco menor y el grupo metilo de la timina en el mayor.

ADN. Lo que no ocurre con el surco menor, que ofrece menos posibilidades de distinguir entre los distintos pares de bases. Por ejemplo, un par A-T es prácticamente igual a un par T-A visto desde el surco menor. Además, la estrecha ranura del surco menor no facilita que las cadenas de aminoácidos de las proteínas reguladoras entren en contacto con los posibles grupos donadores o aceptores de puentes de hidrógeno. Por otra parte, debido a la proximidad de los grupos fosfato, el surco menor presenta una mayor densidad de cargas iónicas y constituye el sitio ideal para interacciones inespecíficas, como las que se producen entre el ADN y las histonas de los nucleosomas.

Así pues, una "palabra clave" se compone, en general, de varios pares de bases, varias letras o unidades de información, ordenadas en una secuencia determinada. El análisis por rayos X de cristales de proteínas reguladoras fijadas a ADN ha puesto de manifiesto que ciertas cadenas de aminoácidos establecen puentes de hidrógeno con dos pares de bases consecutivos de la doble cadena del ADN. Se teje así una red de interacciones débiles (puentes de hidrógeno y fuerzas de van der Waals) que, en su conjunto, son responsables de la especificidad de la interacción entre proteínas y ADN.

Desde el punto de vista estadístico, el número de letras necesario para acotar sin ambigüedad una "palabra clave" en el interior del genoma depende de la complejidad de éste, es decir, de su número total de letras. En el genoma humano, compuesto de unos tres mil millones de pares de bases, una secuencia de 15 pares de bases ocurriría con una probabilidad estadística cercana a 1. Las palabras reguladoras son, en general, más cortas, y se encuentran repetidas en forma de palíndromo. Su frecuencia estadística suele hallarse entre 10 y 100 por genoma haploide. Esta degeneración se compensa frecuentemente con palabras reguladoras que aparecen en forma de bloque ("cluster"), que contienen varias copias más o menos perfectas organizadas en tándem.

Ahora bien, puesto que las proteínas reguladoras poseen también afinidad inespecífica por el ADN, independientemente de su secuencia, la probabilidad de que una secuencia particular se halle ocupada por una proteína determinada dependerá de la concentración de la proteína y de la diferencia entre su afinidad específica por la "palabra clave" y su afinidad inespecífica por el ADN en general. Además, y considerando que el resto del ADN contiene secuencias de nucleótidos con distintos grados de semejanza con la "palabra clave" en cuestión, resulta virtualmente imposible aplicar cálculos teóricos a este tipo de problemas. La afinidad manifestada debe calcularse por vía experimental para cada secuencia particular de ADN.

Otro aspecto que contribuye a complicar el estudio de la interacción entre proteínas y ADN es el de la necesidad de considerar las consecuencias de la interacción sobre la conformación de ambas macromoléculas. Lo mismo el ADN que la proteína suelen experimentar cambios conformacionales en virtud de su interacción mutua, cambios que contribuyen al que sufre la energía libre de la reacción. Y es posible que esas alteraciones conformacionales inducidas por la interacción entre proteína y ADN formen parte del mecanismo de regulación de la expresión génica.

Ha llegado el momento, de acuerdo con el plan establecido antes, de ocuparse del mecanismo molecular implicado en la activación de la transcripción por proteínas reguladoras. Con profundidad, hasta ahora sólo se ha estudiado en un número limitado de sistemas procariotas. Sabemos así que el represor del bacteriófago *lambda* activa la transcripción de su propio gen mediante una interacción directa del represor fijado al operador Or2 con la ARN-polimerasa. Se ha descubierto un mecanismo similar en otros represores.

En cuanto a los sistemas eucariotas, se desconocen las bases moleculares, aunque se supone que hay tam-

bién una interacción entre proteínas fijadas al ADN que estabilizaría la formación de un complejo de transcripción; ése sería el mecanismo responsable de la activación de ciertos genes. Y puesto que las secuencias de nucleótidos responsables de la activación de la transcripción (las "palabras clave") se encuentran frecuentemente a bastante distancia del promotor, se supone también que el ADN que las separa formaría un bucle, permitiendo de ese modo la interacción entre ambas proteínas.

Aunque se ignoran los pormenores moleculares de tales contactos proteicos, la promiscuidad funcional característica de las proteínas reguladoras sugiere que no implican ninguna especificidad particular ni una complementariedad exacta. Esta idea recibe apoyo también del descubrimiento según el cual ciertas regiones, relativamente cortas, de la secuencia aminoacídica de algunas proteínas reguladoras de levadura están capacitadas para actuar como regiones transactivadoras en experimentos de transferencia génica. El análisis de las propiedades de estas regiones transactivadoras en las proteínas GAL4 y GCN4 revela que contienen una hélice *alfa* anfipática con elevada concentración de aminoácidos de carácter ácido. Tras ésa, se han descrito otras regiones transactivadoras ricas en los aminoácidos glutamina, prolina, serina y treonina. Todo ello induce a pensar que, lo mismo que sucede con los dominios fijadores al ADN, las proteínas transreguladoras podrían también agruparse en clases o familias de acuerdo con el tipo de dominio transactivador de que dispongan.

Se desconoce también de qué modo interactúan estos dominios transactivadores con la maquinaria básica de la transcripción. Sin pruebas experimentales sólidas, se ha propuesto una interacción directa entre proteínas transreguladoras y una región repetida de la subunidad *beta* de la ARN polimerasa-II. En algunos casos parece haber un contacto directo de ciertas proteínas reguladoras con el factor de transcripción TFIID que reconoce la secuencia TATA de los promotores transcritos por ARN-polimerasa II. Este factor, clonado recientemente en levadura, en *Drosophila* y en humanos parece constar de dos dominios: uno central, responsable de la fijación al ADN y de la actividad basal de transcripción, y otro N-terminal, variable y posiblemente implicado en la respuesta a los factores activadores de la transcripción.

Desde hace muy poco han comenzado a aflorar datos experimentales que abonan la existencia de proteínas adaptadoras que servirían de puente entre las proteínas reguladoras y la maquinaria de transcripción. Así, por ejemplo, la proteína VP16 del virus herpes simple dispone de un potente dominio transactivador de fuerte carácter ácido, pero no se fija directamente al ADN. Y se acaba de demostrar que esta proteína interactúa, por un lado, con la proteína reguladora OTF-1 u Oct-1 (que se fija al ADN) y, por otro, con el factor de transcripción básico TFIID. Proteínas semejantes se han descrito también en levadura y en *Drosophila*; servirían de mediadores para diversas proteínas reguladoras.

Aun cuando el modelo de transactivación por medio de la interacción proteína-proteína es el que hasta el momento ha recibido más apoyo experimental, no hay que olvidar otras posibilidades. Aparte de la presumible intervención de la estructura de la cromatina, de la que algo diremos más adelante, existe también la posibilidad de que la fijación de las proteínas reguladoras al ADN induzca cambios conformacionales de la doble hélice; modificaciones que serían reconocidas por factores de la maquinaria de la transcripción. Este mecanismo quizás explicara el importante papel desempeñado por la topología del ADN en la regulación de la expresión génica. En opción alternativa, la topología del ADN podría afectar la capacidad del ADN localizado entre distintas regiones reguladoras para formar bucles que faciliten la interacción entre las correspondientes proteínas fijadas al ADN.

Desde un punto de vista más ge-

6. MECANISMOS DE ACTIVACION de la transcripción. Indicamos dos: interacción directa e interacción indirecta. En el primer caso, una proteína transreguladora (PR) fijada a una palabra clave (*pc*) activa la transcripción mediante la interacción directa con el dominio N-terminal del factor de transcripción TFIID ligado a la caja TATA. En el segundo caso, la interacción entre PR y TFIID viene mediada por una proteína adaptadora (PA), imprescindible para activar la transcripción.

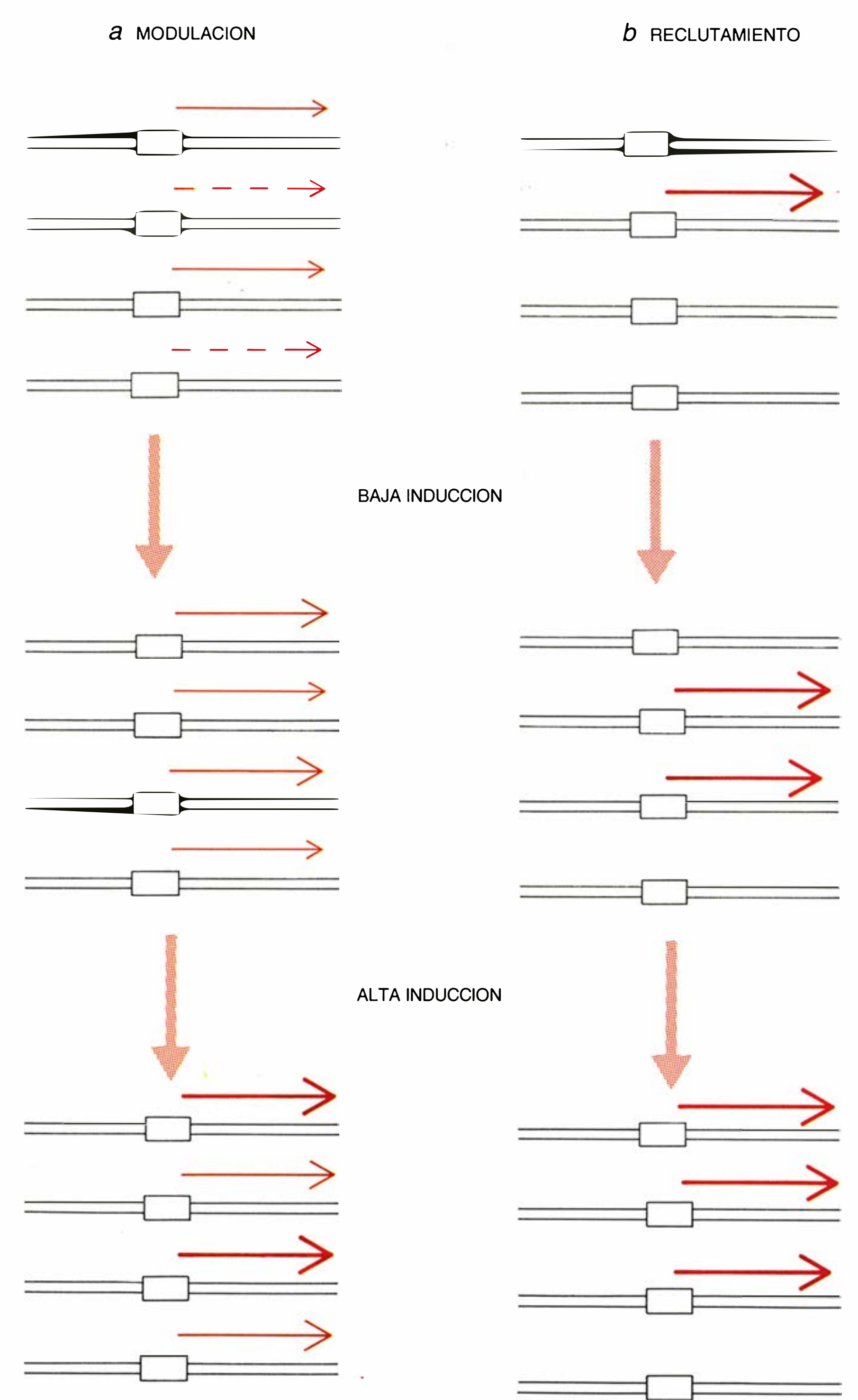
neral, existen dos posibilidades de inducir la actividad de un promotor: por regulación del uso eficaz del mismo o por incremento del número de promotores que participan en la transcripción sin variar su eficacia individual. El primer modelo viene a ser una modulación de cada promotor; el segundo, un reclutamiento de promotores en la forma activa.

No existe, probablemente, un mecanismo unitario para todos los sistemas descritos. En el caso de la inducción del MMTV (virus del cáncer de mama en ratón) por glucocorticoides, todo parece indicar que se lleva a cabo mediante un mecanismo de reclutamiento; es decir, un promotor determinado es activo o inactivo, pero su eficacia intrínseca no varía durante el proceso de inducción. Ocurre la inducción porque, tras la administración de la hormona, una proporción mayor de promotores se encuentra en la forma activa.

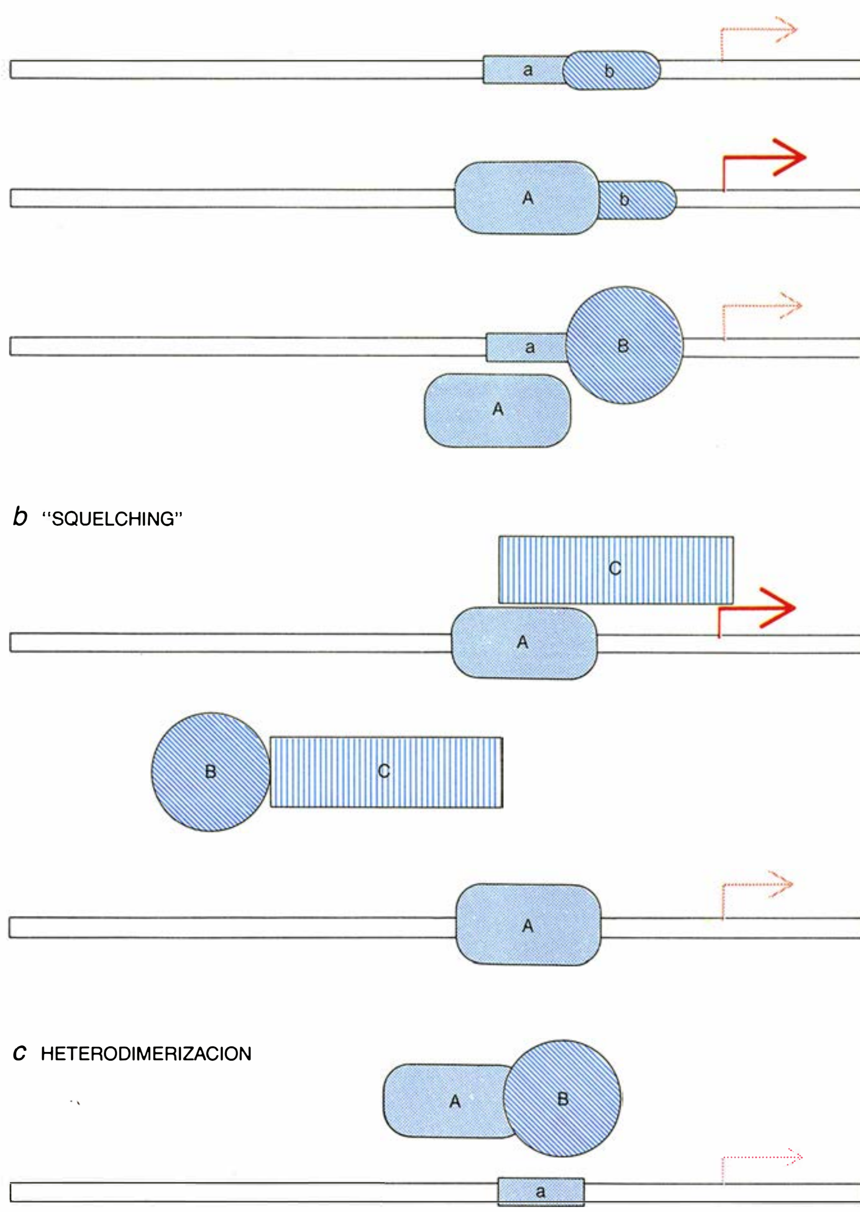
Esta distinción entre modulación y reclutamiento no tiene un interés puramente académico, sino que conlleva implicaciones importantes para la interpretación de los datos experimentales. Si el modelo de reclutamiento es válido, entonces las proteínas reguladoras, al inducir la expresión de un gen, sólo facilitarían la formación de un complejo de transcripción activo, sin tomar parte directa en la transcripción. Se trataría, por tanto, de factores de ensamblaje o de reclutamiento de otros factores de transcripción básicos, que, a su vez, determinarían la eficacia de la utilización del promotor en cuestión. Estos distintos modelos son verificables experimentalmente.

¿Cómo se reprime la transcripción? En gran número de casos se ha demostrado que las mismas proteínas transreguladoras que, en ciertas condiciones, activan la transcripción de determinado gen, logran, en un contexto distinto, mediar la represión de otros genes. A menudo se ha comprobado incluso que las mismas secuencias de ADN, las mismas palabras reguladoras, se hallan implicadas en los efectos positivos (inducción) y en los efectos negativos (represión) sobre la expresión génica. Estos hallazgos subrayan la validez de la interpretación "lingüística" del mensaje codificado en el ADN; se trata de un lenguaje en cuyo seno el sentido de las distintas palabras viene condicionado por el contexto, la frase, del que forman parte.

No existe una teoría unitaria sobre los mecanismos moleculares de la represión. Todo parece indicar, sin embargo, que las diversas posibilidades teóricas hallan aplicación en distintos sistemas. Uno de los mecanismos más obvios de represión consiste en la competición entre proteínas reguladoras por la fijación a secuencias solapantes de ADN. Por ejemplo, si la expresión de un gen particular en ciertas células depende de la interacción entre la proteína *A* con la secuencia *a* del promotor, y esta secuencia solapa otra palabra reguladora *b* reconocida por la proteína *B*, la fijación de *B* puede inhibir la in-



7. DIFERENTES MODELOS de regulación de la transcripción, en función del grado de inducción. En la serie de la izquierda, se esquematiza la modulación de la transcripción de los promotores; en la de la derecha, el reclutamiento progresivo de promotores inactivos en el estado activo a medida que aumenta la inducción. La actividad de cada promotor, en este segundo caso, es una propiedad intrínseca que no cambia durante la inducción; para cada promotor hay dos estados: activo o inactivo.



8. MECANISMOS DE REPRESION de la transcripción. Distinguimos tres: pugna por la fijación al ADN, secuestramiento ("squelching") y heterodimerización. En el primero (*arriba*), la proteína transreguladora A actúa mediante su fijación en la secuencia *a*. Esta interacción con el promotor queda inhibida con la fijación a la secuencia *b* de la proteína B. En el mecanismo de secuestramiento (*centro*), la proteína transreguladora A necesita, para activar el promotor, unirse a la proteína adaptadora C, que a su vez está capacitada para interactuar con la proteína B. Un exceso de proteína B liga toda la proteína C e impide su activación del promotor. En la heterodimerización (*abajo*), la proteína A forma un heterodímero inactivo con la proteína B. Para activar la transcripción, la proteína A debe formar un homodímero consigo misma o un dímero con otra proteína distinta de B.

teracción eficaz de *A* con el promotor y, con ello, el efecto positivo sobre la transcripción. Para que opere este mecanismo de represión se exige que la proteína *B* no pueda ejercer de activador en las células en cuestión, debido quizás a la falta de cierto factor de transcripción.

Este mecanismo ha sido descrito por Pamela Mellon, del Instituto Salk en San Diego, para la inhibición por glucocorticoides de la expresión del gen de la subunidad *alfa* de la hormona gonadotrófica. El gen se expresa bajo el control del AMP cíclico, cuyo mediador, la proteína CREB (proteína que se enlaza con el elemento de respuesta de AMPc), interactúa con dos secuencias CRE de 18 pares de bases en el promotor. Solapando estas secuencias CRE se encuentran tres sitios fijadores para el receptor de glucocorticoides, dos de los cuales están implicados en la inhibición de la transcripción. La fijación del receptor hormonal a estos elementos impediría la acción de CREB y explicaría el efecto inhibidor de la hormona. Por razones no aclaradas del todo, el receptor de glucocorticoides unido al promotor de la subunidad *alfa* no es capaz de activar eficazmente la transcripción en las células diana de coriocarcinoma. Este tipo de represión mediante la competencia por secuencias reguladoras ha salido a la luz en varios sistemas más.

También se conocen casos, sin embargo, en los que la represión se lleva a cabo sin que el agente represor posea afinidad por el ADN. Caben entonces dos posibilidades: el represor *B* compite con un activador *A* por la interacción con un mediador *C* esencial para la inducción o bien el represor interactúa directamente con el activador inhibiendo su función. El primer mecanismo, que parece mostrar escasa especificidad, se ha observado en múltiples sistemas; lo propuso Marc Ptashne, de la Universidad de Harvard, y le dio el nombre de secuestramiento ("squelching"). El segundo mecanismo podría implicar la formación de heterodímeros entre proteínas reguladoras pertenecientes a distintas familias. Este tipo de mecanismo explicaría la inhibición mutua entre el oncogén *fos* y el receptor de glucocorticoides, según ha descrito el autor de este artículo en colaboración con Rolf Müller, de la Universidad de Marburgo.

Hasta ahora hemos abordado la regulación de la expresión génica sin tomar en consideración la organización del ADN en cromatina. Este tipo de enfoque reduccionista es consecuencia de los tradicionales estudios en procariotas, en los que, con más o menos razón, se suponía que el ADN constituía una molécula desnuda. Pero en los eucariotas el ADN nuclear está densamente empaquetado y altamente estructurado en cromatina, cuya unidad básica es el nucleosoma.

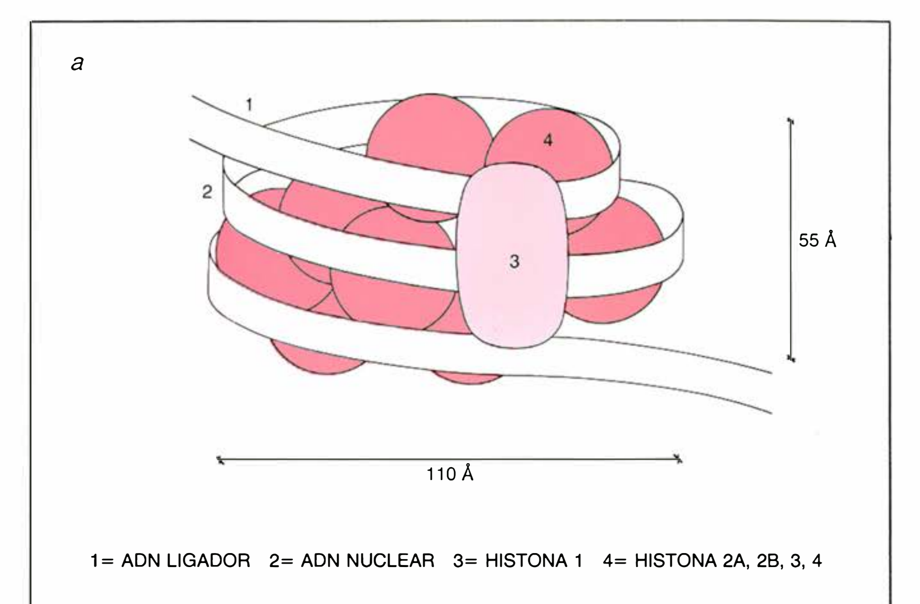
El nucleosoma consta de un núcleo proteico globular formado por un octámero de histonas a cuyo alrededor se arrollan 1,8 vueltas del ADN. Los nucleosomas semejan perlas de un collar enlazados por ADN y compactados por la histona H1; esta proteína interactúa principalmente con el ADN ligador ("linker"), situado entre los nucleosomas. Desde el descubrimiento de la cromatina se ha venido discutiendo la posibilidad de que tal estructura intervenga en el proceso de la expresión génica. Hasta hace unos pocos años, creíase que, en la heterocromatina (o cromatina com-

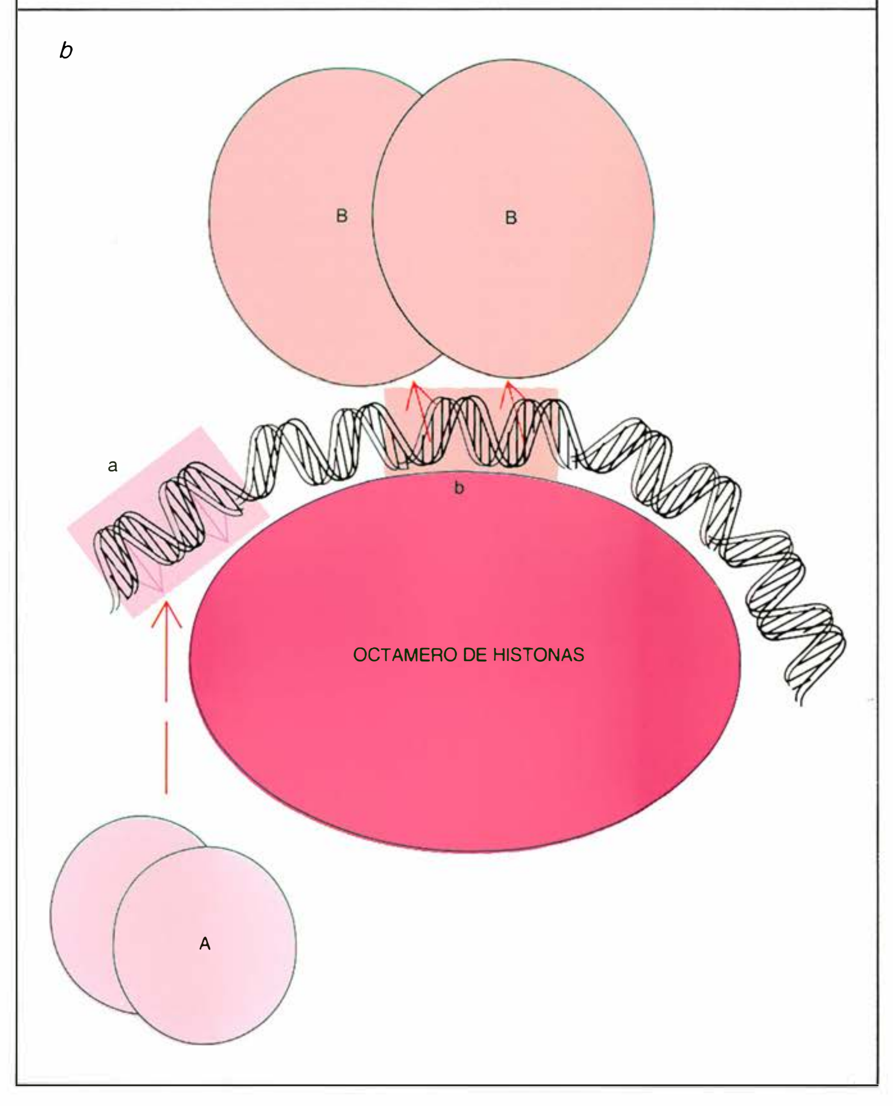
pactada), el ADN no era accesible a las proteínas reguladoras, mientras que en la eucromatina (o cromatina extendida) no habría limitaciones a dicho acceso. Se basaba esa opinión en la hipótesis de que los nucleosomas no se alojaban de manera precisa a lo largo del ADN, sino de modo estocástico y variable.

En los últimos años se han ido acumulando pruebas de que, en ciertas regiones del genoma con carácter regulador, la estructura de la cromatina no es aleatoria, sino que los nucleosomas se alojan con precisión a lo largo del ADN. Se asentó así la idea de que las proteínas reguladoras sólo podrían fijarse a secuencias del ácido desoxiribonucleico ligador localizadas en las regiones que unen dos nucleosomas, mientras que, en el interior de un nucleosoma, la presencia de las histonas impediría la interacción entre proteínas y secuencias reguladoras específicas.

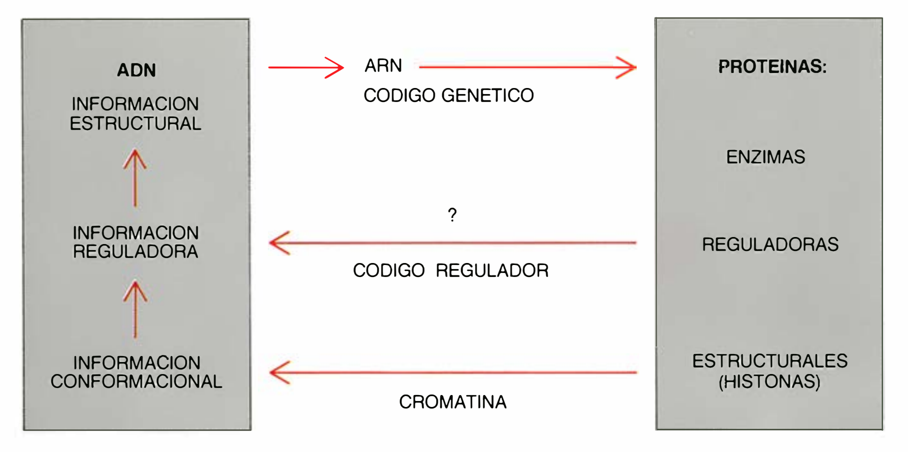
Sin embargo, los estudios de alta resolución han demostrado que la doble hélice de ADN adopta, en la superficie del nucleosoma, una posición bien precisa, de modo que ciertos pares de bases se colocan con el surco mayor expuesto hacia el exterior del nucleosoma, en tanto que otros se hallan en orientación contraria, con el surco mayor dirigido hacia el interior del nucleosoma y, por tanto, inaccesible. Claro está que existen también todas las posiciones intermedias. En este caso se plantea la cuestión de si la posición precisa de la doble hélice no determinaría la accesibilidad de las secuencias reguladoras para las correspondientes proteínas y factores de transcripción.

Un ejemplo de este tipo de regulación lo hallamos en el promotor del MMTV, inducido, según hemos dicho, por hormonas esteroideas en células mamarias. Hélène Richard-Foy y el grupo de Gordon Hager, del estadounidense Instituto Nacional de la Salud, han demostrado que la región reguladora del MMTV se organiza de forma precisa en nucleosomas y que un nucleosoma cubre las secuencias responsables de la fijación de los receptores hormonales y, por consiguiente, de la inducción hormonal, el llamado HRE (elemento sensible a la hormona). Tras administrar la hormona, se observa un cambio en la estructura de la cromatina con la aparición de una zona hipersensible a la nucleasa exactamente sobre el HRE, lo que puede interpretarse como la rotura de un nucleosoma. Simultáneamente se observa la fijación de factores de transcripción,





9. INFLUENCIA DE LA POSICION DEL ADN en la superficie del nucleosoma sobre la accesibilidad a éste por parte de proteínas reguladoras. El nucleosoma consta de un octámero compuesto de dos dímeros de histonas H3/H4 y dos dímeros de histonas H2B/H2A (*arriba*). Al cortarlo en sección, se nos muestra la orientación de la doble hélice y la accesibilidad diferencial de distintas secuencias clave. Mientras que la palabra clave *a* se encuentra con el surco mayor dirigido hacia el interior del nucleosoma y es, por consiguiente, inaccesible para la proteína A, la palabra clave *b* tiene su surco mayor orientado hacia el exterior del cromosoma y puede ser reconocida por la proteína B.



10. CICLO DE INFORMACION en los organismos eucariotas. La información estructural que se halla contenida en el ADN en forma de código genético y la secuencia de los ARN estructurales necesita, para su lectura correcta, en el tiempo y en el espacio biológicos, la información reguladora que se encierra en las "palabras clave", cuya accesibilidad está, a su vez, determinada por la información conformacional contenida en la estructura de la cromatina. La lectura de la información reguladora y conformacional viene establecida por la actividad de proteínas transreguladoras codificadas en la información estructural del ADN. Este ciclo debe imaginarse en tres dimensiones y representa solamente una vuelta de una espiral cuya tercera dimensión sería el tiempo biológico.

entre ellos NF1, a esta zona del promotor de MMTV.

En experimentos de reconstrucción *in vitro*, nuestro grupo de la Universidad de Marburgo ha demostrado que la doble cadena de ADN de esta zona del MMTV adopta una posición precisa en la superficie de un nucleosoma, de modo que resultan inaccesibles las secuencias de reconocimiento del factor de transcripción NF1, mientras que los receptores hormonales sí pueden reconocer algunos de sus sitios fijadores en el HRE, que se hallan con el surco mayor expuesto al exterior del nucleosoma. Parece, pues, que se ha seleccionado la secuencia de MMTV por su capacidad para situarse en una posición adecuada en la superficie del nucleosoma, al objeto de permitir el acceso a los receptores hormonales e impedir, al propio tiempo, la fijación de NF1, ejerciendo así de "represor". Esta capacidad del ADN constituye una propiedad intrínseca de su secuencia que le lleva a adoptar cierta curvatura preferencial, incluso en ausencia de histonas, como puede demostrarse mediante la creación de minicírculos cerrados. Debemos el estudio molecular de ese comportamiento a Andrew Travers, de la Universidad de Cambridge, y a otros autores, quienes han puesto de manifiesto la inclinación de los dinucleótidos A-T o T-A por situarse con su surco menor, más comprimible que el de los dinucleótidos C-G o G-C, dirigido hacia el interior del nucleosoma.

Aunque no ha podido demostrarse todavía el carácter general de esa clase de información, van acumulándose los ejemplos pertenecientes a sistemas distintos. Así, los experimentos realizados con cepas de levadura mutadas en los genes de histonas por el grupo de Michael Grunstein, de la Universidad de California en Los Angeles, refuerzan la idea de que nos encontramos ante un mecanismo de validez general para sistemas regulados. Una ventaja reseñable de este tipo de información reguladora derivada de la estructura del ADN en cromatina estriba en que podría fácilmente heredarse durante la división celular; en efecto, al formarse los nucleosomas en las dos nuevas moléculas de ADN, éste adoptaría la posición determinada por su secuencia de nucleótidos, perpetuando así su comportamiento genético en las células hijas. La conformación del ADN en la superficie de los nucleosomas podría, a su vez, venir condicionada por la fijación de ciertas moléculas reguladoras, que competirían con los octámeros de histonas por determinadas secuencias del ADN. Podría de esa forma explicarse, en parte, el establecimiento y el mantenimiento de un fenotipo diferenciado en el curso del desarrollo de los organismos pluricelulares.

Este tipo de información conformacional contenida en el ADN representa, en cierto modo, un nivel semántico distinto del que caracteriza a la información lineal directa que corresponde al código genético y a las palabras reguladoras clave. Así como las enzimas complejas extraen, de su estructura espacial y de su interacción con otras proteínas, información de importancia funcional, la información posicional del ADN en cromatina depende de la conformación de la doble hélice en tres dimensiones y de su interacción con el nucleosoma. Y así como la estructura terciaria y cuaternaria de las proteínas está determinada, en principio, por su secuencia de aminoácidos, si bien su realización requiere interacciones complejas, también la conformación del ADN en proteína se halla determinada por la secuencia primaria de nucleótidos, aunque exige interacciones con otros componentes para manifestarse.

De lo expuesto se deduce que el ADN eucariota conlleva, además de la información que codifica proteínas y ADN, dos tipos de información reguladora importantes para la lectura del mensaje genético: una información lineal compuesta de las "palabras clave", leída directamente por las proteínas transreguladoras, y una información tridimensional, que se manifiesta en la estructura exacta de la cromatina y determina la accesibilidad de las "palabras clave".

La interacción dinámica en el tiempo y en el espacio de estos distintos tipos de información constituye lo que podría llamarse ciclo informacional, que sería responsable, primero, del correcto desarrollo del huevo fecundado y, luego, del funcionamiento adecuado del organismo adulto y de sus respuestas a las alteraciones del medio ambiente. Es ésta una hipótesis de trabajo que tiene todavía muchos puntos débiles y es mucho lo que hay que avanzar en el terreno de las pruebas experimentales para corroborarla. Pero no vemos que sea arriesgado afirmar que no habrán de transcurrir muchos años antes de que logremos determinar su validez.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

GNOMIC. A DICTIONARY OF GENETIC CODES. E. N. Trifonov y V. Brendel, VCH, Weinheim, 1986.

THE FORMATION AND FUNCTION OF DNASEI HYPERSENSITIVE SITES IN THE PROCESS OF GENE ACTIVATION. S. C. R. Elgin en *J. Biol. Chem.*, vol. 263, págs. 19259-19262, 1988.

A GENETIC SWITCH. GENE CONTROL AND PHAGE LAMBDA. M. Ptashne. Cell Press & Blackwell. Cambridge, EE.UU., 1988.

HELIX-TURN-HELIX, ZINC-FINGER, AND LEUCINE-ZIPPER MOTIFS FOR EUKARYOTIC TRANSCRIPTIONAL REGULATORY PROTEINS. K. Struhl en *TIBS*, vol. 14, págs. 137-140, 1989.

ACTIVATORS AND TARGETS. M. Ptashne y A. A. F. Gann en *Nature*, vol. 346, págs. 329-331, 1990.

El número de familias de la materia

Los experimentos realizados en el CERN europeo y en el SLAC estadounidense, en los que se provocaban colisiones electrón-positrón, han mostrado que, en el universo, solamente hay tres familias de partículas fundamentales

Gary J. Feldman y Jack Steinberger

El universo que nos rodea está formado por tres partículas fundamentales. Son el quark "arriba", el quark "abajo" y el electrón. Las estrellas, los planetas, las moléculas, los átomos y, evidentemente, nosotros mismos, estamos formados por conglomerados de esas tres entidades. Junto con el compañero neutro y posiblemente carente de masa del electrón, el neutrino electrónico, integran la primera familia de la materia.

Pero la naturaleza no es tan sencilla. Aloja dos familias más, idénticas a la primera en todos los aspectos, salvo en lo relativo a su masa. ¿Por qué ha optado por darnos tres réplicas del mismo esquema de la materia? ¿Podría haber más de tres familias? Los experimentos recientes han rechazado una respuesta afirmativa.

En la primavera y el verano de 1989, grupos de físicos que trabajaban en el Acelerador Lineal de Stanford (SLAC) y en el Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN), situado cerca de Ginebra, acometieron diversos experimentos. Utilizaron máquinas distintas para provocar el choque de electrones (e^-) con positrones (e^+), de los que resultaran partículas Z (o Z^0).

De cuantas se han observado, Z es la partícula elemental dotada de mayor masa, que centuplica la del protón y casi iguala la de un átomo de plata. Según veremos, esta masa es sólo un valor promedio. La vida media de la Z, brevísima, explica que las partículas Z difieran ligeramente en su masa. La gama de valores que abarca la masa recibe el nombre de anchura de masa, magnitud que depende del número de familias de la materia. Anchura que, al poder medirse experimentalmente, nos permite inferir el número de familias de la materia. Describiremos aquí los experimentos merced a los cuales se consiguió fijar el número de familias.

Pero concédasenos la licencia metodológica de colocar ese hito en el horizonte, en perspectiva. El último cuarto de siglo ha asistido a una notable sistematización de nuestro conocimiento de las partículas elementales y de sus interacciones relativas. Las partículas conocidas se dividen en fermiones y bosones de fase (o de "gauge"). Los fermiones son partículas de espín 1/2, es decir, tienen un momento angular intrínseco de $1/2\hbar$, donde $\hbar$ es la unidad de acción de Planck, unos 10^{-27} erg por segundo. Los fermiones pueden considerarse como los constituyentes de la materia. Los bosones de fase son partículas de espín 1, o momento angular $1\hbar$. Pueden considerarse los mediadores de las fuerzas entre los fermiones. Además de sus espines, estas partículas se caracterizan por sus masas y por sus interacciones mutuas, sus cargas eléctricas por ejemplo.

Todas las interacciones conocidas se adscriben a una de las tres clases siguientes: electromagnéticas, débiles y fuertes. Una cuarta interacción, la gravedad, es despreciable en el dominio de las partículas elementales. Aunque las tres interacciones parezcan diferentes, su formulación matemática es similar. Todas se explican en el marco de teorías en las que los fermiones interaccionan con intercambio de bosones de fase.

La interacción electromagnética, la que rige la unión entre electrones y núcleos para formar átomos, está mediada por el intercambio de fotones, los bosones de fase electromagnéticos. La interacción débil está mediada por W^+, W^- y Z, bosones pesados, mientras que la interacción fuerte está mediada por los ocho "gluones", carentes de masa. Así, el protón consta de tres quarks que se mantienen unidos por intercambio de gluones.

Estas interacciones describen también la creación de partículas en las colisiones de alta energía. Pensemos en la conversión de un fotón en un electrón y un positrón, o en la aniquilación de un electrón que colisiona con un positrón a una energía altísima, para producir una partícula Z.

La evolución de estas teorías de fase

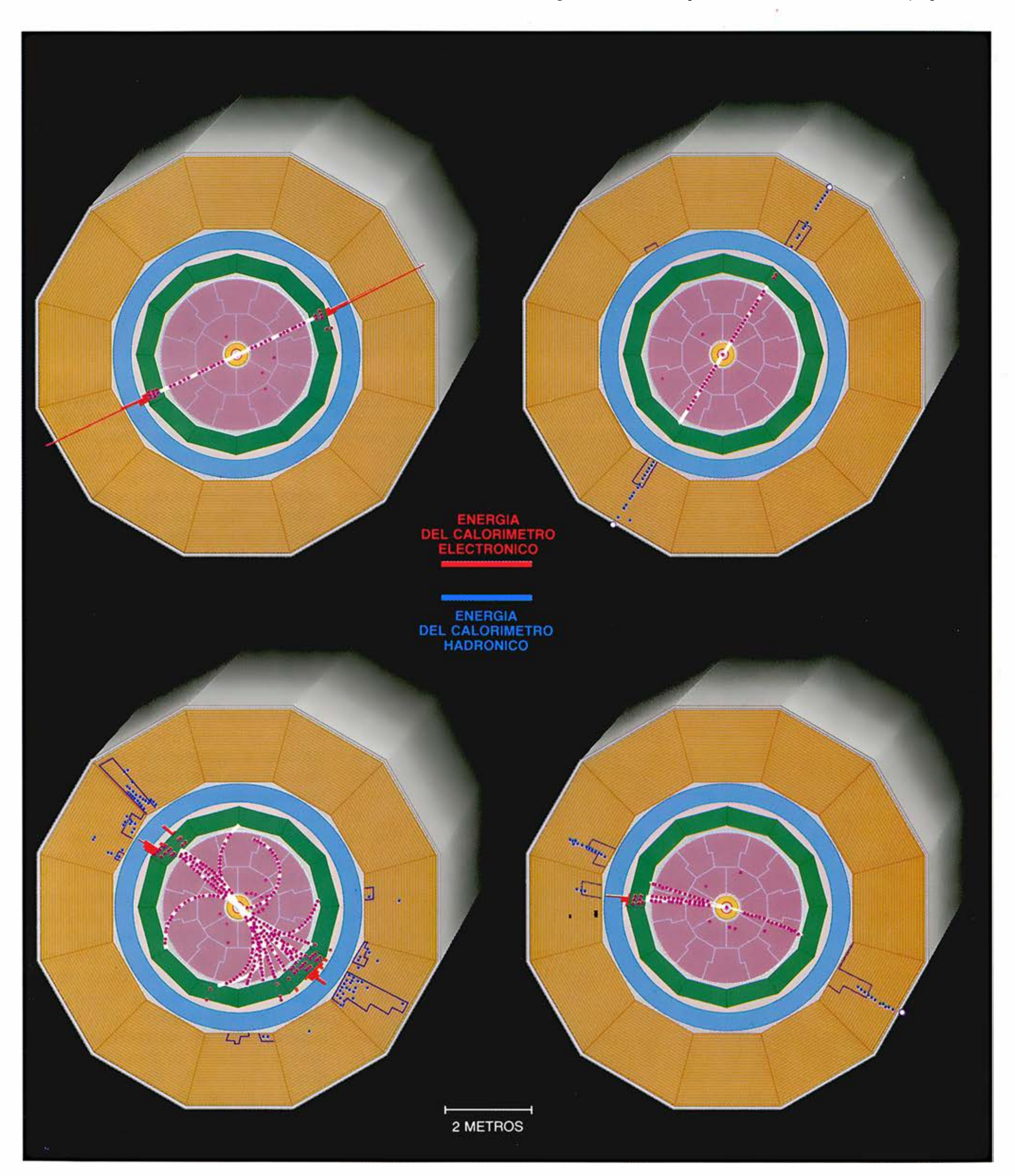
GARY J. FELDMAN y JACK STEINBERGER han destacado en el empeño por determinar el número de familias de la materia. Feldman se doctoró por la Universidad de Harvard en 1971. Codirigió Mark II, el detector del Colisionador Lineal de Stanford (SLC). El pasado otoño se trasladó a Harvard y empezó a estudiar las colisiones protón-antiprotón que se desarrollan en el Acelerador Fermilab de Batavia. Steinberger se doctoró por la Universidad de Chicago en 1948. Desde 1968 ha pertenecido al Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN). Entre 1983 y 1990, dirigió el detector Aleph. Descubridor del neutrino muónico en 1962, le fue concedido compartir el Nobel de física en 1988.

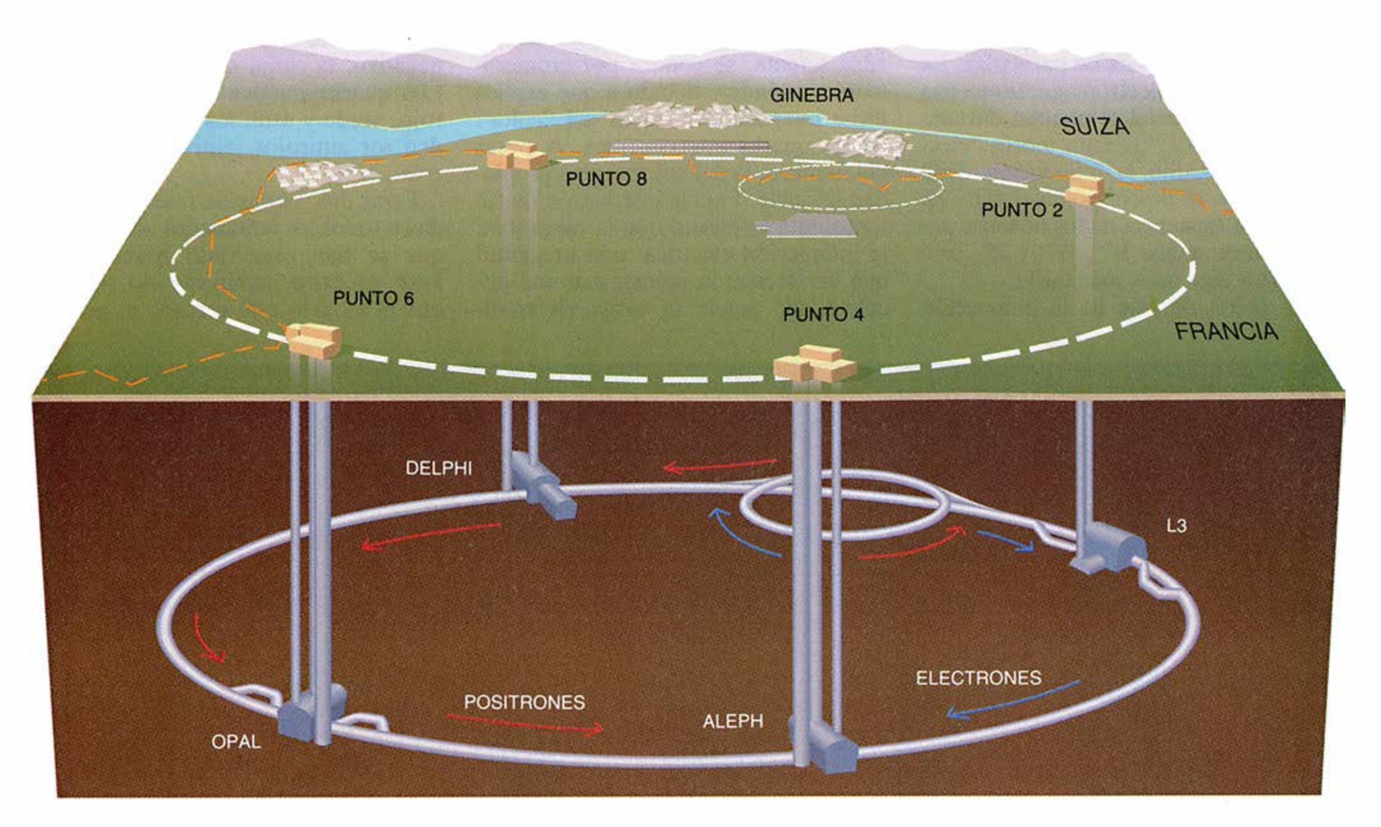
1. EL DETECTOR ALEPH, uno de los cuatro de que consta el Gran Colisionador Electrón-Positrón (LEP) del CERN, registró estas desintegraciones típicas de partículas *Z*. Los diagramas de las secciones transversales muestran los productos de la desintegración de *Z* cuando atraviesan el detector. Las cuatro desintegraciones son (*en sentido horario desde arriba, a la izquierda*) un electrón y un positrón, que aparecen en forma de línea única de puntos; dos muones, que secundan las trayectorias de los electrones, aunque penetran en los dispositivos trazadores más externos; dos leptones tau, uno de los cuales se ha desintegrado en un muon y dos neutrinos que no se ven, y el acompañante que se ha desintegrado en tres piones; y dos quarks, que forman chorros hadrónicos. La mayoría de partículas *Z* se desintegran en quarks. Los histogramas (*azul y rojo*) representan las energías de las partículas.

constituye un avance, de sorprendente elegancia, de la física de partículas. La unificación del electromagnetismo con la interacción débil se planteó durante los años 1968-1971. Esta teoría "electrodébil" predijo la interacción débil neutra, que se descubrió en el CERN en 1973, y la existencia de los bosones pesados intermedios W^+, W^- y Z^0, descubiertos diez años más tarde.

La teoría de fase de la interacción fuerte, propuesta a principios de los años setenta, se conoce por cromodinámica cuántica, debido a que explica dicha interacción a través del "color" de los quarks intervinientes. A pesar del nombre, la del color es una propiedad invisible. Para la interacción fuerte representa lo mismo que la carga para la interacción eléctrica: una magnitud que caracteriza la fuerza; con una peculiaridad: donde la carga electrodinámica tiene sólo un estado, positivo o negativo, la carga de color tiene tres. Los quarks pueden tener los colores rojo, verde y azul; los antiquarks pueden ser antirojos, antiverdes y antiazules.

Estas dos teorías de fase juntas predicen todos los fenómenos elementales que se han observado hasta ahora. Pero su éxito manifiesto no significa que el modelo esté cerrado y, por de-





2. GRAN COLISIONADOR ELECTRON-POSITRON para crear bosones *Z* que resulten del choque entre electrones y positrones en un anillo de almacenamiento, que mide 27 kilómetros de circunferencia. Las partículas circulan en sentidos opuestos, formando paquetes. Los imanes confinan los dos haces en sus órbitas; la energía de radiofrecuencia los acelera hasta una energía total de cerca de 90.000 millones de electronvolts, cifra equivalente a la masa de la partícula *Z*. Los paquetes se topan frontalmente 45.000 veces por segundo en distintos puntos de los detectores Aleph, Opal, Delphi y L3.

cirlo así, techado. La teoría de fase predice la existencia de la partícula de Higgs, que, se supone, encerraría la clave del origen de la masa de las partículas. La teoría de fase incluye también unas constantes físicas arbitrarias, tales como las intensidades de acoplamiento de las interacciones y las masas de las partículas. Una teoría completa debería justificar por qué se encuentran en la naturaleza estos valores concretos.

Entre las reglas que dimanan de la teoría electrodébil, una exige que los fermiones vayan a pares. El electrón y el neutrino electrónico forman uno de esos pares; se llaman leptones por su relativa ligereza. De acuerdo con otra regla establecida, cada partícula debe tener su antipartícula: electrón y antielectrón o positrón, neutrino electrónico y antineutrino electrónico. Cuando las partículas y las antipartículas colisionan pueden aniquilarse entre sí y producir partículas secundarias. Tales reacciones están en la base de los experimentos que analizaremos.

A fin de evitar algunos desastres de la teoría, muy sutiles, es necesario asociar un determinado par de quarks con un par de leptones. El electrón es el leptón cargado más ligero y se asocia, por tanto, con los quarks más ligeros, el quark *u* (o quark arriba) y el quark *d* (o quark abajo). Los quarks no se han visto en estado libre; sólo se encuentran ligados a otros quarks o antiquarks.

El protón, por ejemplo, está formado por dos quarks *u* y un quark *d*; el neutrón, por dos quarks *d* y un quark *u*. En los experimentos de alta energía se ha visto la existencia de una segunda familia completa y la mayor parte de una tercera. En cada caso, las partículas son mucho más masivas que los correspondientes miembros de la familia anterior (los neutrinos son una posible excepción). Los dos leptones de la segunda familia son el muon y el neutrino muónico; sus quarks son el quark "encantado", o quark *c*, y el quark "extraño", o quark *s*. Los miembros confirmados de la tercera familia son los dos leptones, el leptón tau y el neutrino tauónico, y el quark "fondo" o quark *b* (de "bottom"). El quark restante, conocido como quark "cima", o quark *t* (de "top"), es crucial para la teoría electrodébil. La partícula no se ha descubierto, pero creemos que existe y suponemos que es demasiado masiva para haberse creado en nuestros aceleradores.

Ninguno de los miembros de la segunda y tercera familia son estables (de nuevo con la posible excepción de los neutrinos). Sus vidas medias están comprendidas entre una millonésima y una diezbillonésima de segundo; después, se desintegran en partículas de menor masa.

Hay dos lagunas importantes en la agrupación de partículas de la teoría electrodébil. La primera, relativa a los pares: aunque la teoría exige que los fermiones vayan a pares, no especifica cuántos pares constituyen una familia. No hay ninguna razón por la que cada familia no pueda tener, además de sus leptones y quarks, partículas de otra clase todavía por observar. Segunda, la teoría no dice nada acerca del número de familias de la materia. ¿Hay otras familias formadas por partículas cuya masa impida su creación en los aceleradores existentes?

Los físicos se ven obligados a introducir en las teorías, de una manera *ad hoc*, las masas observadas. Alguna regularidad se deja atisbar, sin embargo. Dentro de cierta clase de partículas (por ejemplo, un leptón cargado o un quark de carga +2/3 o −1/3), la masa aumenta bastante en cada familia sucesiva. El menor de tales aumentos es el salto de un factor de casi 17 entre el muon de la segunda familia y el leptón tau de la tercera.

Los leptones poseen siempre menos masa que los quarks y, en cada par de

leptones, el neutrino es siempre la partícula más ligera. No sabemos si los neutrinos poseen masa siquiera: la observación experimental se limita a poner una cota superior a la masa que pueden tener.

Semejante liviandad resulta decisiva para el método que se describe aquí sobre el cómputo de familias de partículas. Aun cuando los miembros quark o leptón de una cuarta, quinta o sexta familia fueran demasiado masivos como para crearse en los aceleradores existentes, seguiría siendo alta la probabilidad de que sus neutrinos carecieran de masa o fuera ésta pequeña. Casi con certeza, la masa de tales neutrinos sería menor que la mitad de la masa del bosón *Z*. Por tanto, si existen tales neutrinos, cabría esperar su presencia entre los productos de desintegración de *Z*, la única partícula que se desintegra copiosamente en pares de neutrinos.

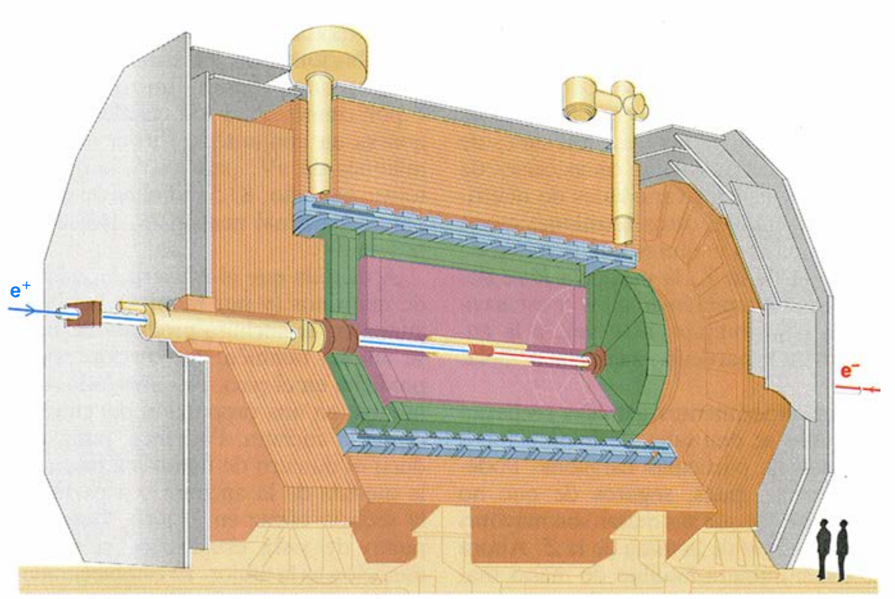
Por desgracia, los neutrinos son difíciles de detectar debido a que no intervienen en las interacciones electromagnéticas o fuertes. Sólo llegan a la materia a través de fuerzas a las que, con propiedad, se las tilda de "débiles": la mayoría de neutrinos atraviesan la Tierra sin interaccionar. En los experimentos, la existencia de neutrinos se infiere indirectamente.

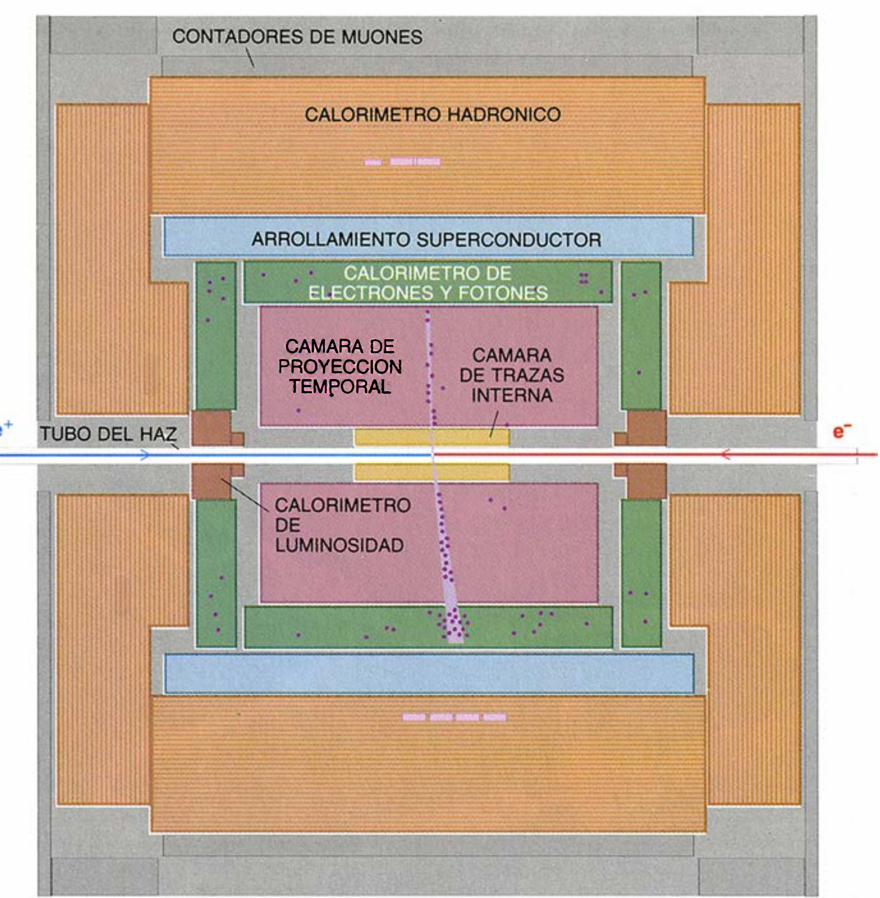
El proceso comienza creando partículas *Z*. Las *Z* pueden producirse mediante un par electrón-positrón cuyas energías cinéticas combinadas alcancen la diferencia entre sus masas en reposo (expresadas mediante su energía equivalente) y la masa en reposo de *Z*. Como estos leptones tienen masas en reposo muy pequeñas, cada uno de los haces en los que viajan irán a una energía altísima, de 45.500 millones de electronvolt, la mitad aproximada de la masa de *Z*.

Si *Z* fuera perfectamente estable, la energía del haz debería igualar este valor, a fin de conservar la energía y el momento. Pero tan perfecta estabilidad es imposible, ya que si *Z* puede crearse a partir de partículas, también debe ser libre para desintegrarse otra vez en ellas. La verdad es que la partícula *Z* tiene muchos "canales" donde desintegrarse, y cada canal de desintegración acorta su vida.

La corta vida de *Z* deja su masa indeterminada y la medida de la indeterminación puede utilizarse para contar las familias de la materia. Expliquemos la razón. Estipula el principio de indeterminación de Heisenberg que, cuanto más corta sea la duración de un estado, más incierta será su energía. Como la partícula *Z* tiene vida corta, su energía o, equivalentemente, su masa, poseerá un grado de incertidumbre. Esto significa lo siguiente: podemos medir con mucha precisión la masa de una partícula *Z* cualquiera, pero a diferentes *Z* les corresponderán masas ligeramente distintas. Si representásemos en una gráfica las masas medidas de muchas *Z*, la curva resultante adquiriría una forma acampanada, cuya anchura es proporcional al ritmo de desintegración de *Z*.

La forma acampanada se mide variando la energía de colisión y observando el número de partículas *Z* producidas. Los datos obtenidos trazan una curva que presenta un pico, o re-





3. DETECTORES DE ALEPH y su disposición en capas, a modo de catafilos de cebolla. Suministran datos a los ordenadores, para que éstos puedan reconstruir los sucesos de desintegración gráficamente (*abajo*). Las partículas dotadas de carga dejan traza. La energía de las partículas, dotadas o no de carga, se mide en calorímetros y se representa en histogramas. Aleph pesa 4000 toneladas (*arriba*).

suena, a una energía de los haces combinada de unos 91.000 millones de eV. El pico de la sección eficaz, tal es este punto, define la masa media de la Z. La anchura de la curva de resonancia delimita la incertidumbre de la masa de la partícula.

La anchura iguala a la suma de anchuras parciales constituidas por cada uno de los canales de desintegración de la partícula Z. Los canales conocidos son las desintegraciones a pares de partícula y antipartícula de todos los fermiones de masa menor que la mitad de la masa de la Z: las tres variedades de leptones cargados, las cinco clases de quarks y las tres variedades de neutrinos. Si hubiera otros fermiones cuyas masas fueran menores que la mitad de la masa de la Z, la partícula Z se desintegraría también en ellos, y estos canales contribuirían, a su vez, a la anchura de la partícula, incrementándola.

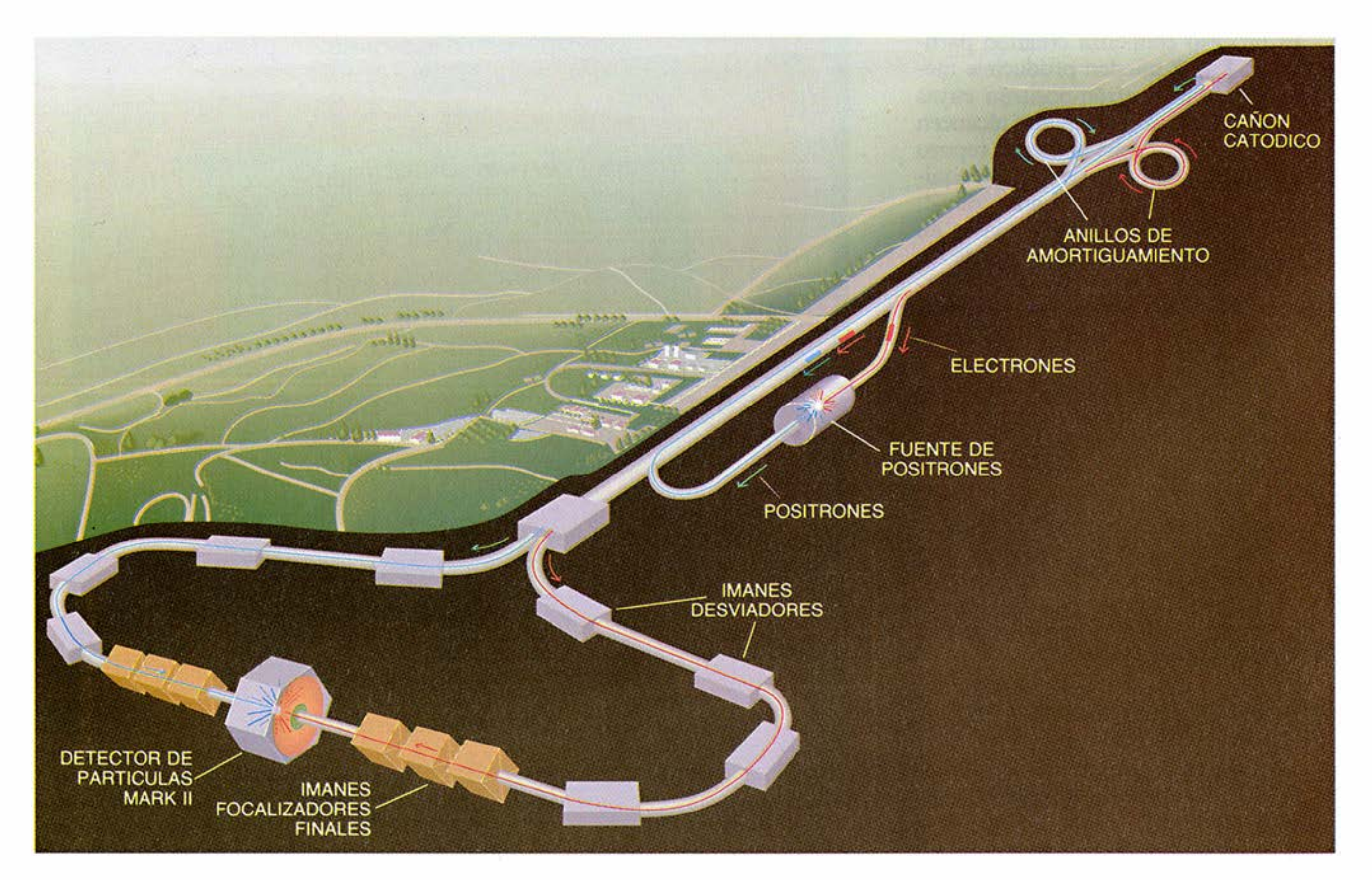
Los experimentos actuales rechazan que se den tales desintegraciones en nuevas partículas cargadas. Podemos estar, pues, seguros de que no existen o de que sus masas son mayores que la mitad de la masa de la Z. Ahora bien, si hubiera familias de masas mayores, entonces cabría todavía esperar que sus neutrinos tuvieran masas mucho menores que la mitad de la masa de la Z. Por ende, la partícula Z también se desintegraría en estos canales; aunque en estos experimentos no se observarían directamente los neutrinos, sí contribuirían a la anchura de la Z, y en ese sentido serían detectables. Este principio permite que los experimentos numeren las familias de la materia.

La teoría electrodébil predice las contribuciones de los canales conocidos con una precisión aproximada del 1 por ciento. Para los canales de los quarks en conjunto se cifran en 1740 millones de eV; para cada canal leptónico cargado, 83,5 millones de eV, y para cada canal neutrínico, 166 millones de eV.

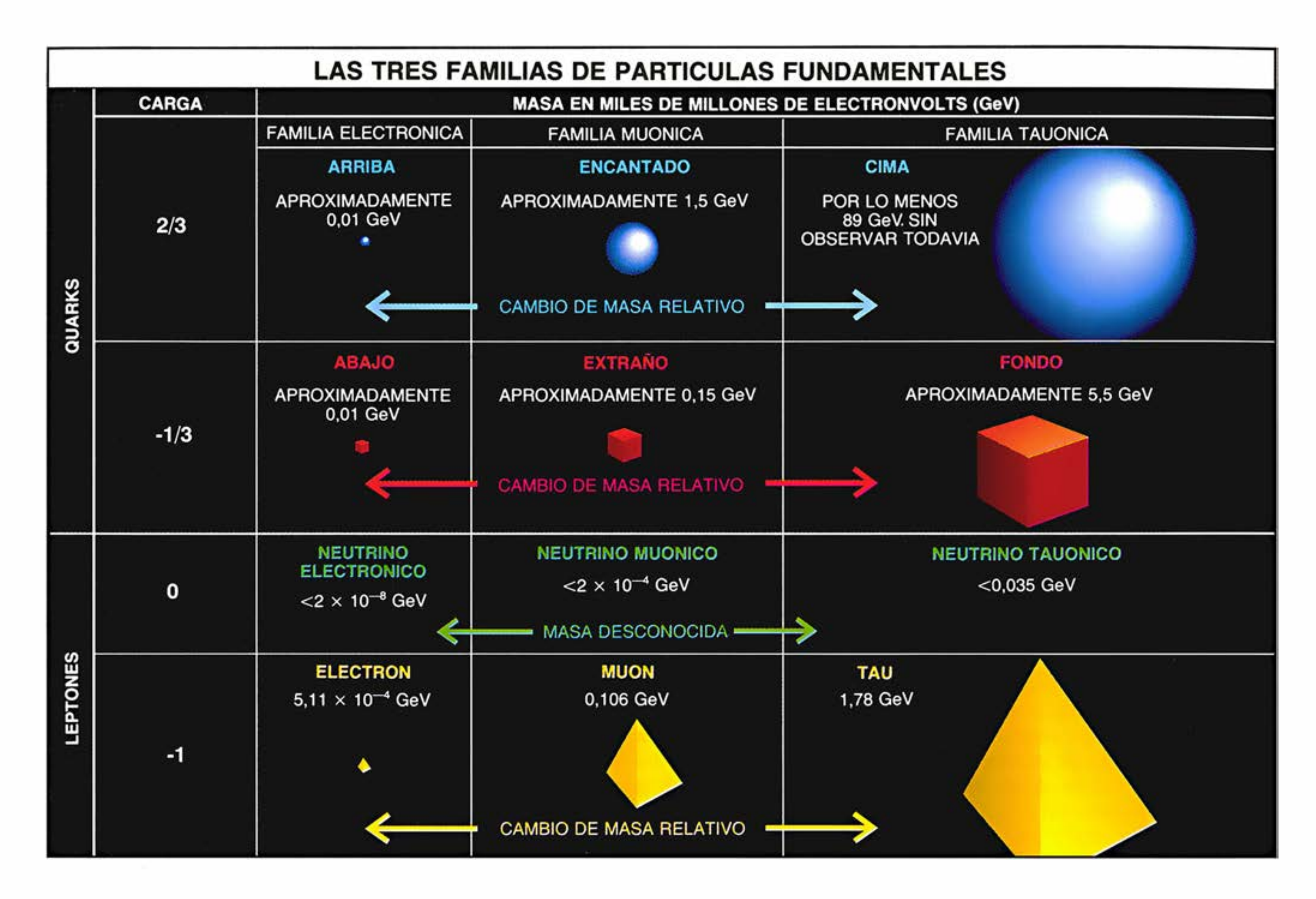
A medida que el número hipotético de neutrinos (y por tanto de familias) aumenta, la anchura predicha de la Z se amplía también. La sección eficaz predicha en el pico, por otro lado, disminuye en una proporción del cuadrado de la anchura. Podemos, pues, deducir el número de familias a partir de la medida de la anchura o a partir de la sección eficaz en el pico. Desde el punto de vista estadístico, la última medición es la mejor. El establecimiento del número de familias a partir de medidas experimentales directas ha tenido que esperar la producción de un gran número de Z mediante el proceso de aniquilación electrón- positrón.

Los investigadores del CERN atacaron el problema creando el LEP, un anillo de almacenamiento tradicional construido a una escala sin precedentes. El anillo, que mide 27 kilómetros de circunferencia, yace soterrado a una profundidad de entre 50 y 150 metros por debajo del llano que existe entre Ginebra y la parte francesa del macizo del Jura. Las cavidades resonantes aceleran los dos haces mediante energía de radiofrecuencia. Los haces corren en sentidos opuestos a través de un tubo casi circular. Los electroimanes, que desvían los haces en cada curva, provocan la colisión de éstos en cuatro zonas, donde existen sendos detectores.

El diseño anular tiene la ventaja de almacenar indefinidamente las partículas, y así pueden continuar circulando y colisionando. En contrapartida, los haces pierden energía en forma de radiación de sincrotrón, una emisión que despide cualquier partícula cargada y sometida a la desviación que le provoca un campo magnético. Tales pérdidas, que a estas energías aparecen como rayos X, aumentan a razón de la potencia cuarta de la energía del haz y de manera inversamente proporcional



4. EL COLISIONADOR LINEAL DE STANFORD acelera positrones y electrones. El inyector dispara electrones (*rojos*) hacia un anillo de amortiguamiento que los condensa, para focalizarlos después. Un paquete penetra entonces en la trayectoria recta, tras otro de positrones (*azul*). Los dos paquetes se aceleran en tándem antes de entrar en unos arcos separados que los focalizan e instan el choque entre ellos en el detector Mark II. Mientras, el segundo paquete de electrones incide en un blanco produciendo positrones, que vuelven al inicio, se amortiguan y se almacenan.



al radio del anillo. Los proyectistas aumentan la energía de los haces inyectando más energía, agrandando los anillos, o haciendo ambas cosas a la vez. Si se optimiza el uso de los recursos, el coste de tales anillos de almacenamiento varía a razón del cuadrado de la energía del haz.

En el Colisionador Lineal de Stanford (SLC), el problema del choque de electrones contra positrones a altas energías se abordó de una forma innovadora. Electrones y positrones se aceleran en un acelerador lineal de tres kilómetros de largo, que había sido construido para otros fines. Se envían a arcos de un kilómetro de largo, se provoca el choque y se amortiguan luego. Los electrones y los positrones pierden en torno al 2 por ciento de su energía respectiva, a causa de la radiación de sincrotrón en los arcos, pérdida que resulta tolerable ya que las partículas no han de volver a circular. Sólo cuenta con un detector, colocado en el punto de colisión.

El LEP es una máquina eficaz. Cuando los haces de electrones y positrones recirculan, se producen unas 45.000 colisiones por segundo. Los haces del SLC chocan, como máximo, sólo 120 veces por segundo. Es obvio que el SLC ha de remontar ese rendimiento, lo que puede lograrse reduciendo la sección transversal del haz a una sección pequeñísima. Cuanto menor se haga el área de la sección transversal, más probable será el choque frontal de un electrón contra un positrón. El SLC ha alcanzado diámetros del haz de cuatro millonésimas de metro, aproximadamente una quinta parte del espesor de un cabello.

Una de las razones esgrimidas para construir el SLC fue la de que serviría de prototipo para esa nueva clase de colisionador. Verdad es que el SLC ha demostrado que las máquinas lineales permiten obtener un número útil de colisiones. Sin embargo, la tasa de producción de partículas *Z* en el LEP centuplica la provocada en el SLAC.

El análisis de los productos de la colisión registrados en los detectores corre a cargo de distintos equipos de físicos. El detector del SLC se llama Mark II; los cuatro del LEP son Aleph, Delphi, L3 y Opal. En el SLAC trabajan unos 150 físicos; cada uno de los equipos del CERN congrega unos 400 profesionales, pertenecientes a institutos de investigación y universidades de dos docenas de países.

Cumple al detector medir las energías y direcciones de cuantas partículas sea posible entre las implicadas en un episodio de colisión; debe, asimismo, identificar su naturaleza, en especial la de los leptones cargados. La constitución en capas de los detectores semeja los catafilos de una cebolla, con dispositivos trazadores en el interior y calorímetros en el exterior. Los dispositivos trazadores miden los ángulos y los momentos de las partículas cargadas. Las trayectorias se resiguen mediante las trazas ionizadas que los productos de la colisión dejan a su paso por un gas adecuado. También se utilizan otros medios, como detectores semiconductores y fibras de plástico emisoras de luz.

Los detectores se colocan en intensos campos magnéticos que curvan las trayectorias de las partículas en proporción inversa a sus momentos. El valor de la curva nos da el momento, y éste constituye, a su vez, un buen índice de la energía. (A las energías de estos experimentos, la energía de una partícula difiere muy poco de su momento.)

Los calorímetros miden las energías de las partículas neutras y cargadas al disipar estas energías en interacciones secundarias sucesivas en algún medio denso. Esta energía se registra entonces y se localiza con tanta precisión como permita la granulación del calorímetro. Los calorímetros cumplen su cometido de diversas formas. El método más corriente utiliza pilas de láminas delgadas de materia densa (plomo, uranio o hierro) separadas por capas de material sensible al paso de las partículas.

Las partículas dejan su huella en

esos materiales golpeando los electrones de sus átomos. El medio más socorrido es el del argón, líquido o en forma de gas combinado con otros gases orgánicos. Los centelleadores plásticos operan de otro modo: cuando los atraviesa una partícula de la reacción, producen un destello luminoso cuya intensidad se mide. El calorímetro suele constar de dos capas, una interior optimizada para la medida de electrones y fotones y otra exterior optimizada para hadrones. (Se llama hadrones a las partículas que sufren la interacción fuerte.)

A fin de recoger todos los productos de la reacción, el detector ideal debería cubrir todo el ángulo sólido que rodea el punto de interacción. El SLAC construyó esos detectores en los años setenta. En el detector Aleph del LEP, el rastreo de los productos de la aniquilación de un electrón y un positrón se desarrolla por etapas.

Cerca del punto de la reacción se sitúa un dispositivo de tiras de silicio que determina el extremo delantero de cada trayectoria con una precisión de diez millonésimas de metro. Ocho capas de alambres de detección siguen entonces la trayectoria a través de una cámara de 60 centímetros de diámetro. Por último, una cámara de proyección temporal, de 3,6 metros de diámetro, utiliza un intenso campo eléctrico para recoger los electrones que las partículas han expulsado de las moléculas del gas. El campo hace que los electrones se desplacen hacia los dos extremos de la cámara cilíndrica, donde se amplifican y detectan en 50.000 pequeños terminales. El punto de origen de cada electrón se deduce del lugar que ocupa en los terminales y del tiempo que tarda en alcanzarlos.

Vayamos con la etapa siguiente, que porta los productos de la reacción hasta el calorímetro electrón-fotón. Los productos cruzan el arrollamiento superconductor que crea un campo magnético de 15.000 gauss en el eje del dispositivo; entran luego en el calorímetro hadrónico. Este dispositivo, formado por una serie de capas de hierro separadas por contadores de gas, retorna también el flujo magnético, a la manera del núcleo de hierro en un imán convencional. Aleph pesa 4000 toneladas y construirlo ha costado 60 millones de dólares. En cada suceso se deben leer medio millón de canales de información, y merece ponderarse el soporte informático necesario para la adquisición y posterior evaluación de los datos.

Los datos recogidos en los primeros meses de funcionamiento de los dos colisionadores han proporcionado la mejor confirmación existente hasta ahora de la teoría electrodébil. Más aún: han dibujado la curva que describe la anchura de la partícula Z con gran precisión.

La inmensa mayoría de las aniquilaciones electrón-positrón observadas generan cuatro grupos de productos: en el 88 por ciento de los episodios resultan un quark y un antiquark; el 12 por ciento restante se reparte a partes iguales entre la producción de un leptón tau y un leptón antitau, un muon y un antimuón, y un electrón y un positrón. (El último caso se limita a invertir la aniquilación inicial.)

En las desintegraciones en electrones y muones se aprecian dos trazas que proceden en direcciones opuestas, con momentos (y energías) correspondientes a la mitad de la energía conjunta de los haces. Los dos productos se distinguen fácilmente por su peculiar comportamiento en los calorímetros. Las desintegraciones en leptones tau son más complicadas, ya que sólo subsisten durante un instante, lapso en el que recorren un milímetro aproximado, antes de desintegrarse en partículas terciarias que son las que pueden observarse. Un leptón tau deja trazas muy juntas o sólo una traza; en uno y otro caso, la señal va acompañada por la de otro leptón tau que se mueve en sentido opuesto (conservándose así el momento).

Los quarks que dan cuenta de la mayoría de las reacciones no se pueden ver en estado libre, o "desnudo". En cuanto se crean, sufren un proceso de hadronización, en virtud del cual cada quark se "viste" de un chorro de hadrones, con un promedio de quince, dos terceras partes de los cuales tienen carga. Este suceso de desintegración, el más complejo de los cuatro, se manifiesta como dos chorros en direcciones opuestas, cada uno de los cuales contiene muchas trazas. Los resultados descritos aquí se basan en el análisis de unas 80.000 desintegraciones de Z en quarks, el resultado conjunto de los cuatro equipos del LEP y el equipo de SLAC.

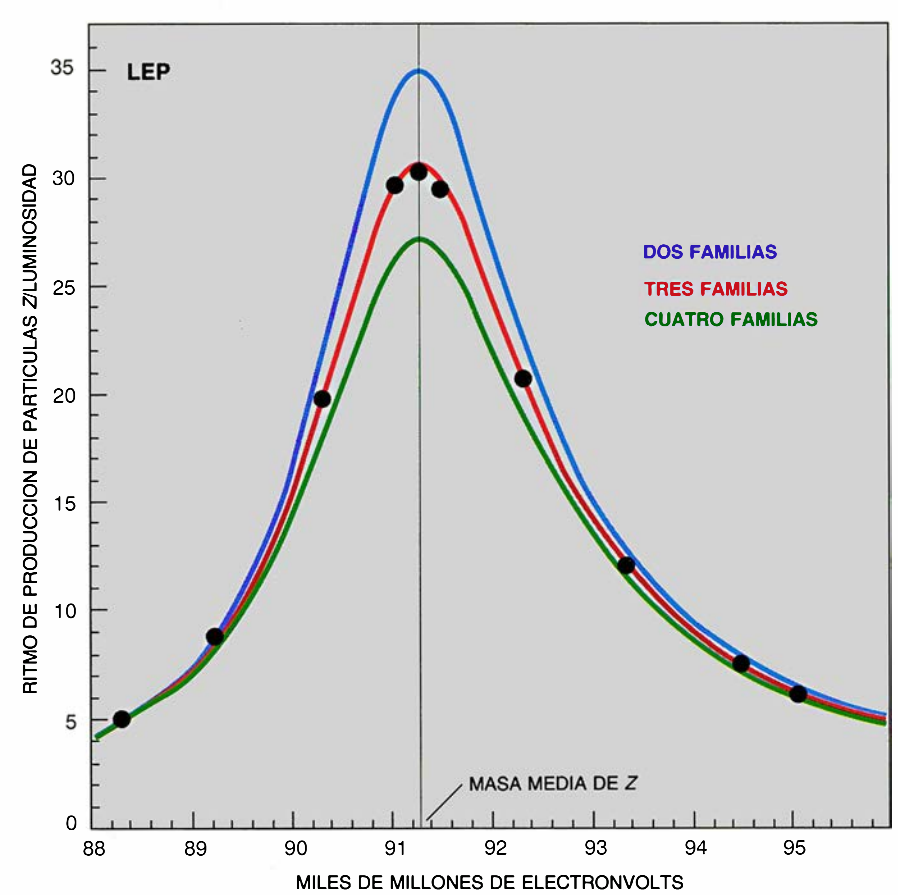
La curva de producción de Z se determina a través de un barrido de la energía. La probabilidad de producción se mide en cierto rango de esta última: a energía de pico y a energías por encima y por debajo. Revestía el máximo interés conocer la energía exacta del haz. Se obtuvo de maneras muy distintas en los dos colisionadores, en ambos casos con una buena dosis de ingenio y con una precisión de tres partes en 10.000.

Tal como se ha señalado antes, la anchura total de la resonancia Z puede determinarse por la altura en la energía del pico o por la anchura de la curva de la resonancia. La altura ofrece menos error estadístico, pero exige conocer no sólo la cadencia de los sucesos, sino también el ritmo con el que se cruzan las partículas de los dos haces. Esta última tasa constituye la luminosidad del colisionador.

En el caso más sencillo de dos haces perfectamente alineados de idéntica forma y tamaño, la luminosidad es igual al producto del número de elec-



5. DETECTOR DE LUMINOSIDAD DE ALEPH para registrar los sucesos de colisión a pequeño ángulo cuando un positrón (e^+) entra por la izquierda y roza un electrón (e^-) que entra por la derecha. Las partículas inciden entonces en calorímetros de grano fino que determinan sus ángulos y miden sus energías. El ritmo o cadencia de estos sucesos mide la luminosidad que debemos conocer para determinar de qué modo los cambios en la energía del haz afectan la probabilidad de producir bosones Z. Esta función de probabilidad predice el número de variedades neutrínicas.



6. CURVAS DE RESONANCIA predichas para la partícula *Z*. Varían según el número de familias de la materia. Las miles de desintegraciones *Z* en quarks observadas en el CERN se representan en forma de puntos. Las mediciones concuerdan con lo que cabe esperar de la existencia de tres familias.

trones y del número de positrones en cada paquete que se cruza, multiplicado por el número de paquetes que se cruzan en cada segundo y dividido por el área transversal de los haces. En la práctica, la luminosidad sólo se determina observando el ritmo de un proceso que se conoce con precisión: la colisión de electrones y positrones que se rozan entre sí bajo ángulos muy pequeños, sin combinarse ni cambiar de estado. Para registrar tales colisiones elásticas, se ponen dos detectores especiales en las regiones de pequeño ángulo al lado del eje del tubo del haz. Delante de la zona de colisión se sitúa uno de los detectores; el otro, detrás. En el caso de Aleph, los detectores son calorímetros electrón-fotón de alta granulación.

Los electrones y los positrones dispersados elásticamente se identifican de dos maneras: por la forma característica de depositar la energía en los detectores y por el modo de alcanzar los dos detectores en direcciones opuestas, produciendo una trayectoria perfectamente alineada. Importa, en esencia, comprender cómo se realiza el registro de las partículas, sobre todo en las partes de los detectores que corresponden a ángulos de colisión extremadamente pequeños. Sépase, en efecto, que la cadencia de detección es sensibilísima ante los cambios de ángulo.

A la hora de ajustar los datos resultantes a la forma teórica de la resonancia, se atiende a tres parámetros: altura del pico, anchura total y la masa de *Z*. Los datos guardan buena coherencia con la forma de la distribución esperada por la teoría. El paso siguiente consiste en determinar el número de familias de neutrinos a partir de dos parámetros independientes: anchura y altura del pico.

Los resultados combinados de los cinco equipos dan una estimación promedio de 3,09 variedades de neutrinos, con un error experimental de 0,09. Este número se aproxima mucho a un entero, tal como debe ser, y coincide con el número de variedades de neutrinos que ya se conocen. Sólo podría existir un cuarto neutrino sin contradecir estos resultados si su masa superara los 40.000 millones de eV, una posibilidad con escasas probabilidades habida cuenta de las masas inmensurables, por lo pequeñas, de los tres neutrinos conocidos.

El resultado de la partícula *Z* coincide con los datos cosmológicos obtenidos por los que estudian la materia a la escala de las galaxias y de los cúmulos de galaxias. Se ha medido la razón de hidrógeno a helio y a los demás elementos ligeros en el universo. Cosmólogos y astrofísicos se han esforzado en reconstruir los procesos por los que han surgido estas concentraciones relativas.

Poco después de la gran explosión que creó el universo e inició su expansión, la materia era tan caliente que era igual de probable que un neutrón se desintegrara en un par protón-electrón, como que éstos se combinaran para formar un neutrón. Había, pues, tantos protones como neutrones. Mas, a medida que el universo se expandió y se enfrió, los neutrones, ligeramente más pesados, se convirtieron en protones con más facilidad que los protones cambiaban a neutrones. Y así, la razón neutrón-protón disminuyó sin cesar.

Cuando el proceso de expansión rebajó la temperatura del universo por debajo de los mil millones de kelvin, los protones y neutrones pudieron comenzar a fusionarse y formar, por tanto, algunos de los elementos más ligeros, helio sobre todo. La concentración resultante depende de manera crítica de la razón entre neutrones y protones en la época en que se formaron los elementos ligeros. A su vez, esta razón depende del ritmo con el que el universo se expande y se enfría. En esta etapa, cada familia de neutrinos ligeros, es decir, cualquiera cuyos constituyentes posean una masa por debajo del millón de electronvolts, contribuye de manera sustantiva a la densidad de energía y a la velocidad de enfriamiento. Las concentraciones medidas de elementos ligeros se muestran coherentes con los modelos cosmológicos que suponen la existencia de dos o tres familias de neutrinos ligeros, pero no con los que suponen cuatro o más.

Quedan todavía muchas cuestiones por contestar. ¿Por qué hay precisamente tres familias de partículas? ¿Qué ley determina las masas de sus miembros, estableciendo que deben cubrir 10 potencias de 10? Son, éstos, problemas centrales de la física de partículas. Algo se ha avanzado con el cómputo del número de familias de la materia.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

QUARKS: THE STUFF OF MATTER. Harald Fritzsch. Basic Books, 1983.

THE COSMIC ONION. Frank E. Close. Instituto Americano de Física, 1988.

THE EXPERIMENTAL FOUNDATIONS OF PARTICLE PHYSICS. Robert N. Cahn y Gerson Goldhaber. Cambridge University Press, 1989.

Fisiología de la percepción

El cerebro transforma de modo casi instantáneo los mensajes sensoriales en percepciones conscientes. Para tan rápido reconocimiento, resulta esencial una caótica actividad colectiva que implica a millones de neuronas

Walter J. Freeman

Cuando alguien mira el rostro de un actor célebre, olfatea un manjar favorito u oye la voz de un amigo, los reconoce de inmediato. En una fracción de segundo tras la estimulación de ojos, nariz, oídos, lengua o piel, sabemos que el objeto nos es familiar, deseable o peligroso. Este reconocimiento, que los psicólogos llaman percepción preatentiva, ¿cómo se produce con tanta exactitud y rapidez aunque los estímulos sean complejos y aunque varíe el contexto en que actúan?

Se sabe ya mucho acerca de cómo el córtex cerebral, la capa externa del encéfalo, analiza inicialmente los mensajes sensoriales. En cambio, sólo están aún en los comienzos las investigaciones para averiguar cómo funciona el cerebro después de la mera extracción de los rasgos más comunes: cómo combina los mensajes con la experiencia pasada y con las expectativas, para distinguir unos estímulos de otros y su particular significación para el individuo.

Los estudios que el equipo de trabajo al que pertenezco viene realizando desde hace más de 30 años en la Universidad de California en Berkeley sugieren que es imposible entender la percepción examinando sólo propiedades de neuronas individuales, enfoque microscópico que suele ser el que predomina en la investigación neurológica. Hemos comprobado que la percepción depende de la actividad cooperativa simultánea de millones de neuronas situadas en muy diversas zonas del córtex. Tal actividad global sólo puede captarse, medirse y explicarse si, junto con el enfoque microscópico, se adopta otro macroscópico.

WALTER J. FREEMAN es profesor de neurobiología en la Universidad de California en Berkeley. Se doctoró por la de Yale en 1954 y posteriormente completó su especialización como neurofisiólogo en la de California en Los Angeles, hasta 1959, año en que entró a formar parte del claustro facultativo de Berkeley.

Algo análogo a este enfoque mixto se da en la música. Para captar la belleza de una pieza coral, no basta con ir oyendo uno tras otro a los distintos cantores, sino que hay que escucharlos en su conjunto, según entonan y modulan sus voces en total concordancia.

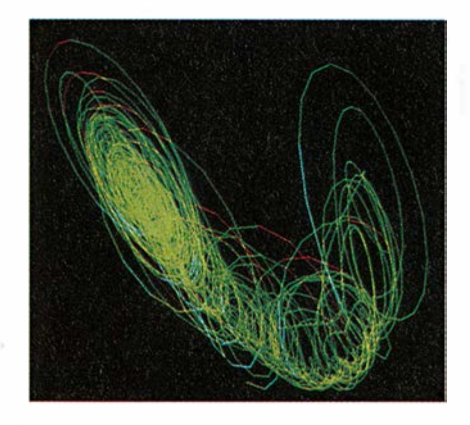
Nuestros estudios nos han llevado también a descubrir en el cerebro cierto "caos": comportamiento complejo que parece casual, aunque de hecho responda a algún orden oculto. Este caos es evidente en la tendencia de amplios grupos de neuronas a cambiar, de repente y a la vez, de un tipo de actividad compleja a otro, en respuesta a cualquier estímulo.

Tal mutabilidad es una característica primordial de muchos sistemas caóticos. En el cerebro no es nociva. De hecho, sostenemos que es precisamente la propiedad que hace posible la percepción. Conjeturamos, además, que el caos subyace a la capacidad del cerebro para responder de modo flexible al mundo exterior y para generar nuevos patrones de actividad, incluidos los que se experimentan como ideas originales.

Para explicar la percepción, hay que partir del conocimiento de las propiedades de las neuronas que la efectúan. Mis colaboradores y yo nos hemos concentrado, en muchos de nuestros estudios, sobre las neuronas del sistema olfatorio.

Hace ya años que se sabe que, cuando un animal o una persona aspira un aroma, las moléculas que lo transportan son capturadas por unas pocas de las muchísimas neuronas receptoras que hay en las vías nasales; los receptores están especializados en responder a las distintas clases de aromas. Las células excitadas disparan potenciales de acción, o pulsiones, que se propagan, a través de los axones, hasta una parte del córtex conocida por el nombre de bulbo olfatorio. El número de receptores activados depende de la intensidad del estímulo; su situación en la nariz expresa la naturaleza del olor. Esto es, cada olor se manifiesta por una disposición espacial de la actividad receptora que, a su vez, se transmite al bulbo.

El bulbo analiza cada tipo de entrada y, a continuación, sintetiza su propio mensaje, que transmite vía axones a otra parte del sistema olfatorio, al córtex olfatorio. Desde allí, se envían nuevas señales a muchas partes del cerebro, de las que no es la menor un área denominada córtex endorrino, donde las señales se com-



1. "RETRATOS FASICOS" realizados a partir de electroencefalogramas (EEG) producidos mediante un modelo informático del cerebro. Reflejan la actividad general del sistema olfatorio en reposo (*arriba*) y durante la percepción de un olor familiar (*derecha*). El parecido con ovillos de alambre, irregulares aunque algo estructurados, revela que en ambas condiciones la actividad cerebral es caótica: complicada, si bien dotada de cierto orden subyacente. La forma más circular de la imagen de la derecha, con su mayor segregación del color, indica que los EEG olfatorios son más ordenados –más periódicos– durante la percepción que en el resto del tiempo.

binan con las que provienen de otros sistemas sensoriales. El resultado es una percepción cargada de significado, una "Gestalt" o configuración que es única para cada individuo. A un perro, el reconocimiento del olor de un zorro puede traerle a la memoria algo que comió y suscitarle expectación de comida. A un conejo, ese mismo olor quizá le evoque recuerdos de persecución y le haga sentir miedo a un ataque.

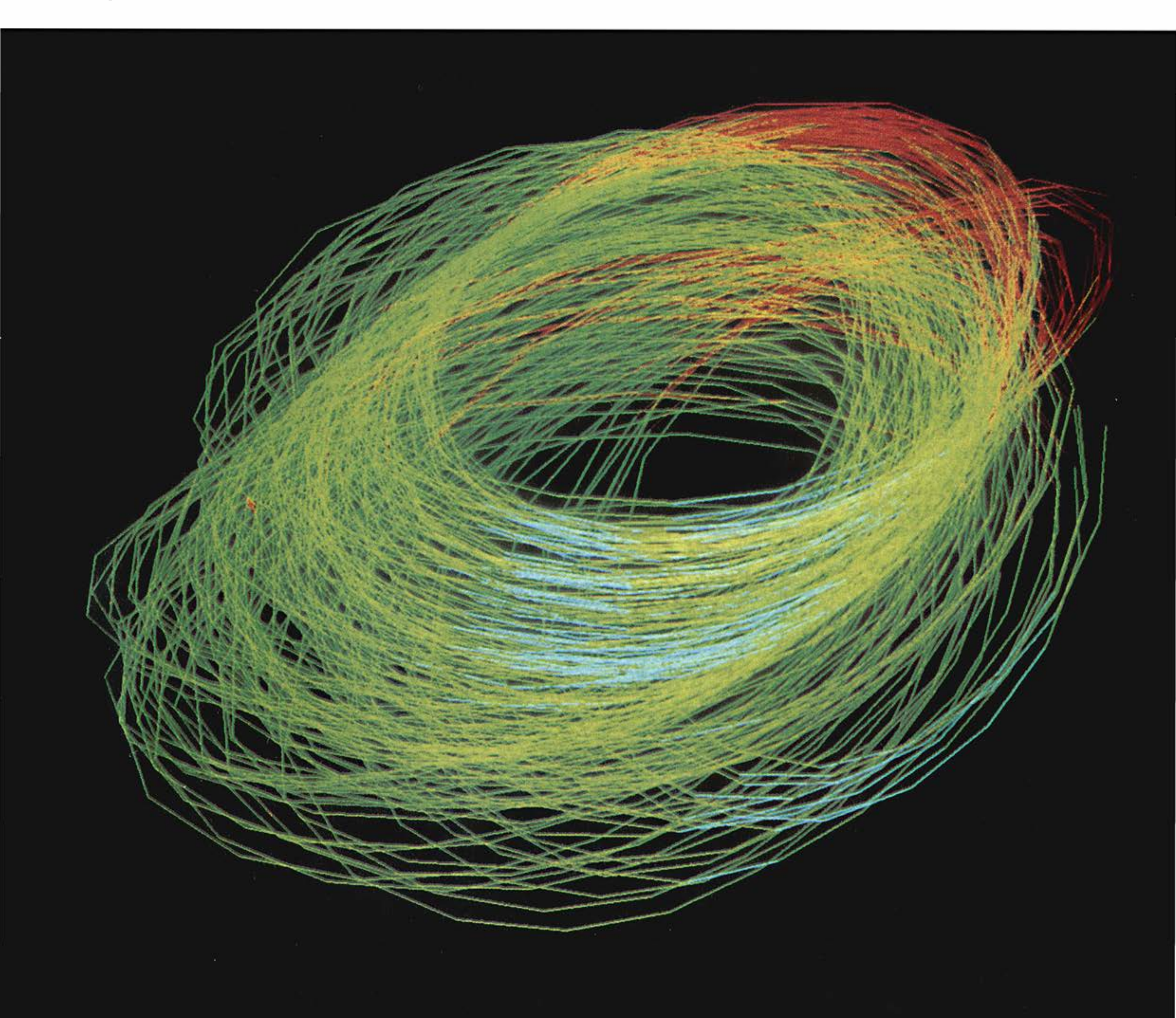
Tal conocimiento ha proporcionado un valioso punto de partida para estudiar con más detalle la olfacción. Pero deja sin resolver dos cuestiones importantes. La primera de ellas es el clásico problema de la separación entre el primer plano y el trasfondo: ¿cómo distingue el cerebro un olor entre todos los demás que lo acompañan?

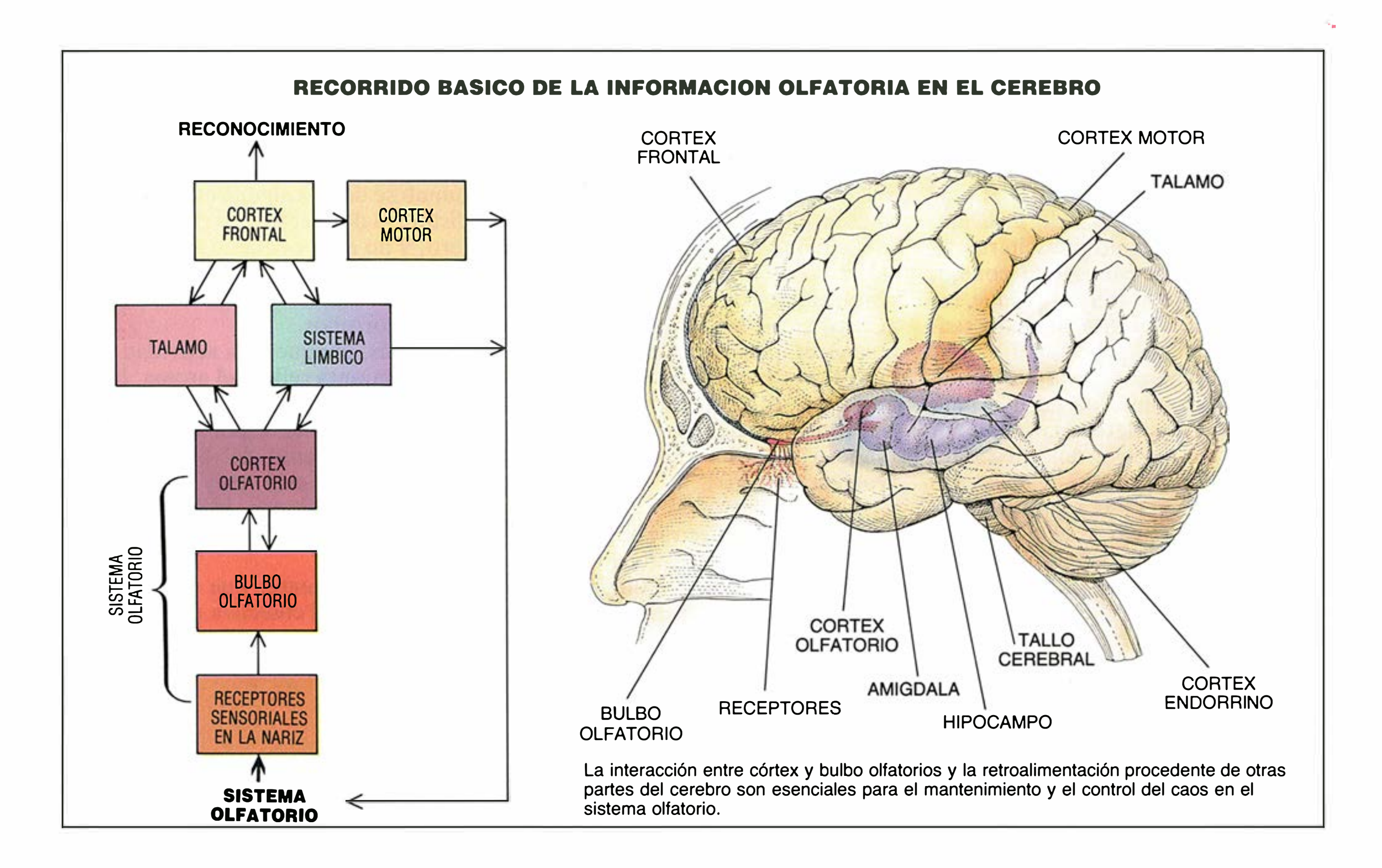
Y también, ¿cómo logra el cerebro lo que se llama la generalización sobre receptores equivalentes? A causa de la turbulencia de la corriente de aire que entra por la nariz, sólo unos pocos de los muchos receptores que son sensibles a un determinado aroma se excitan durante una aspiración, y la selección de los mismos varía imprevisiblemente de una aspiración a otra. ¿Cómo se las arregla el cerebro para reconocer que señales procedentes de distintos grupos de receptores se refieren todas a un mismo estímulo? Nuestras investigaciones están empezando a sugerir respuestas a ambos problemas.

Muchas de nuestras ideas al respecto son el fruto de intensos estudios sobre el bulbo olfatorio. Los experimentos que hemos llevado a cabo demuestran con claridad que todas las neuronas del bulbo participan en la producción de cada percepción olfatoria. En otras palabras, la información más destacada acerca del estímulo se debe a alguna configuración distintiva de la actividad del bulbo entero, y no a un pequeño subgrupo de neuronas detectoras de ese rasgo que sólo sean excitadas, digamos, por los olores zorrunos.

Es más, aunque esta actividad nerviosa conjunta refleja el aroma, la actividad de la misma no viene determinada únicamente por el estímulo. El funcionamiento del bulbo es autoorganizado; está muy controlado por factores internos, incluida la sensibilidad de las neuronas a los estímulos.

Los experimentos que sacaron a la luz la actividad colectiva partieron de





La interacción entre córtex y bulbo olfatorios y la retroalimentación procedente de otras partes del cerebro son esenciales para el mantenimiento y el control del caos en el sistema olfatorio.

un diseño elemental. Aplicando usuales técnicas de reforzamiento, entrenamos animales, casi siempre conejos, para que reconocieran distintos aromas y, al reconocerlos, se comportaran de determinados modos; por ejemplo, relamiéndose o mordisqueando, en expectativa de agua o de comida. Antes de empezar a entrenarlos, conectamos gran parte de sus superficies bulbares a una retícula de 60 a 64 electrodos que distaban entre sí medio milímetro.

Durante el entrenamiento y después, la retícula nos permitió contar con series de 60 a 64 electroencefalogramas (EEG) registrados simultáneamente, según los animales iban inspirando y espirando el aire, y oliendo, unas veces sí y otras no, aromas familiares. Cada trazo de EEG refleja el estado promedio de excitación de los grupos locales de neuronas que se hallan en un estrato definido, inmediatamente debajo de los electrodos. Los picos en la ondulación de los trazos indican aumentos de la excitación; los senos representan menguas de la excitación debidas a factores inhibidores.

No hay que confundir los EEG con los registros de los impulsos disparados por los distintos axones o por grupos de neuronas, aunque cada EEG está también influido por el modo en que se disparan las neuronas de las zonas vecinas en el córtex cerebral. Los trazados detectan esencialmente la misma información que establecen las neuronas cuando "deciden" si disparar o no los impulsos; lo que ocurre es que un EEG registra esa información para millares de células a la vez.

Para comprender con mayor exactitud qué es lo que muestra el EEG, conviene tener en cuenta algunos detalles del funcionamiento de las neuronas del córtex. Estas células reciben sin cesar –por lo común en unas prolongaciones suyas llamadas dendritas– los impulsos de millares de otras neuronas. Los impulsos se transmiten a unas conexiones especializadas (uniones) que reciben el nombre de sinapsis. Algunos de los impulsos que llegan producen en las células receptoras ondas de corriente eléctrica excitadora; otros generan ondas inhibidoras. Estas corrientes dendríticas, así se llaman, recorren todo el cuerpo celular (que contiene el núcleo) y van a parar a una región del mismo denominada zona de disparo, situada al comienzo del axón.

Allí, las corrientes cruzan la membrana de la célula y pasan al espacio extracelular. Mientras esto sucede, la célula calcula la fuerza promedio de las corrientes (que se refleja en los cambios de potencial al atravesar la membrana), esencialmente añadiendo las ondas de corriente excitadora y suprimiendo las inhibidoras. Si el resultado es una corriente que supera el umbral o nivel mínimo de excitación, la neurona produce un disparo.

De manera parecida, el mecanismo que dibuja cada uno de los trazados del EEG suma las corrientes iniciadas en las dendritas, pero las intercepta en cuanto salen de la célula. Los trazados no reflejan el estado de excitación de neuronas individuales, sino del grupo de neuronas, porque el espacio extracelular está atravesado por corrientes que proceden de millares de células.

En nuestros experimentos, los trazados de EEG obtenidos a partir de la retícula de electrodos son tan impredecibles y tan irregulares como los de un garabato a mano alzada. No obstante, manifiestan información perceptiva.

En individuos vivos, los EEG siempre oscilan, esto es, suben y bajan, hasta ciertos puntos, oscilaciones que suelen ser bastante irregulares. Cuando un animal inhala un aroma que le es conocido, puede verse en cada trazo del EEG lo que llamamos una "ráfaga". Todas las ondas procedentes de la retícula de electrodos se vuelven de pronto más regulares u ordenadas durante unos pocos ciclos, hasta que el animal exhala el aire. Las ondas tienen a menudo mayor amplitud (altura) y frecuencia que en otros momentos.

A las ráfagas en cuestión se las lla-

ma a veces ondas de 40 hertz, porque oscilan a unos 40 ciclos por segundo. Como la frecuencia puede variar entre los 20 y los 90 hertz, yo prefiero llamarlas "ondas gamma", en analogía con una banda de rayos X de alta frecuencia.

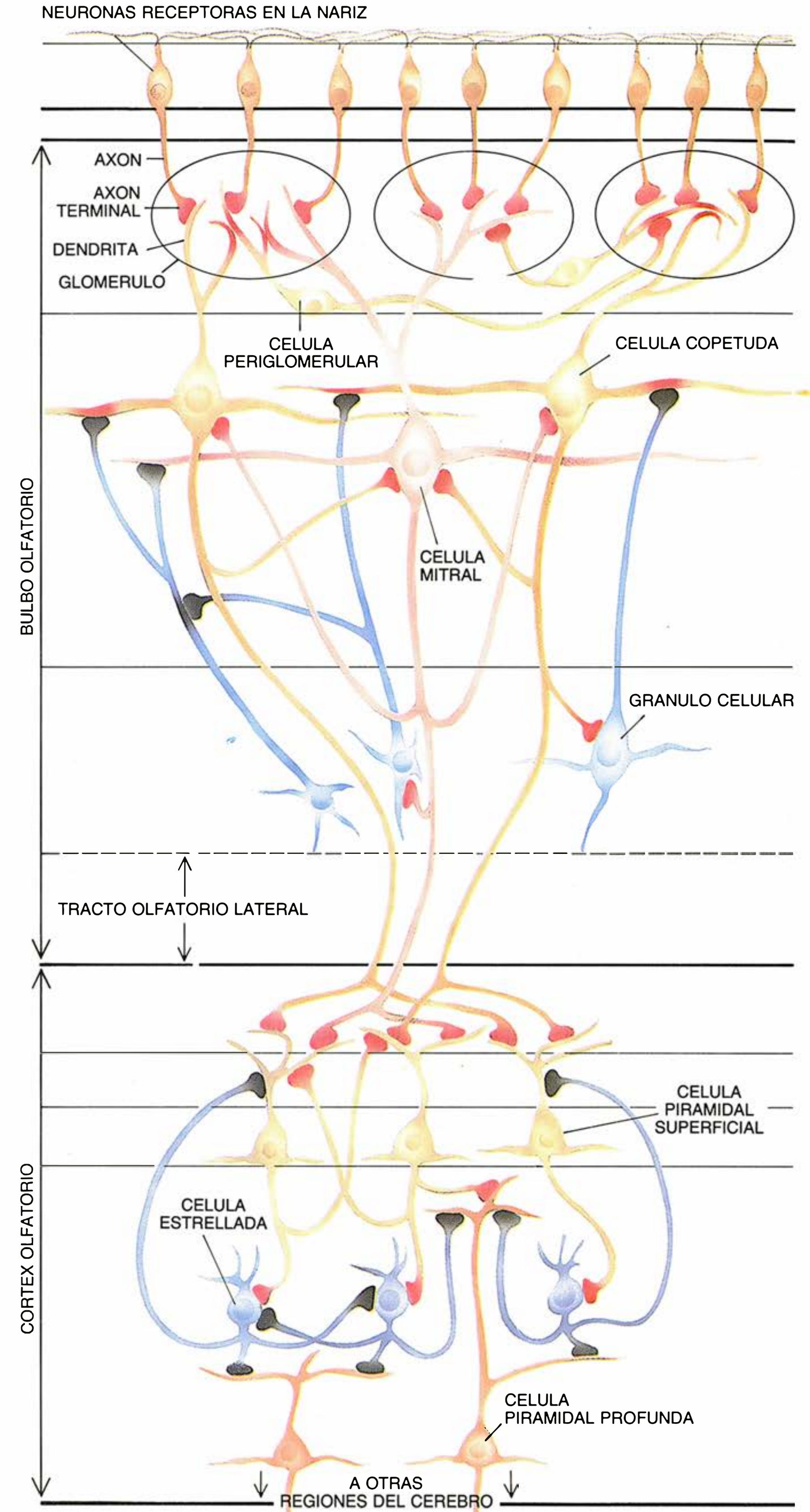
El hecho de que las ráfagas representen una actividad de cooperación o interacción no se traduce sin más en los gráficos de los EEG; la morfología de los segmentos en ráfaga difiere de un trazado a otro en una serie de registros simultáneos. Sin embargo, recurriendo a nuestros ordenadores, nos sentimos capaces de entresacar del enmarañado trasfondo el hilo demostrativo de un comportamiento colectivo o de cooperación.

En cada serie de registros de ráfagas, podemos distinguir una forma de onda común: la onda portadora; todos los trazados participan de un mismo modelo de ascenso y caída en alguno de sus tramos. La amplitud promedio no es idéntica en toda la serie; unas versiones de la onda portadora son más regulares y otras menos. Pero todas ellas se incurvan hacia arriba y hacia abajo casi en sincronía. El comportamiento común viene a ser entre una y tres cuartas partes de la actividad total de las neuronas que dan origen a cada trazado.

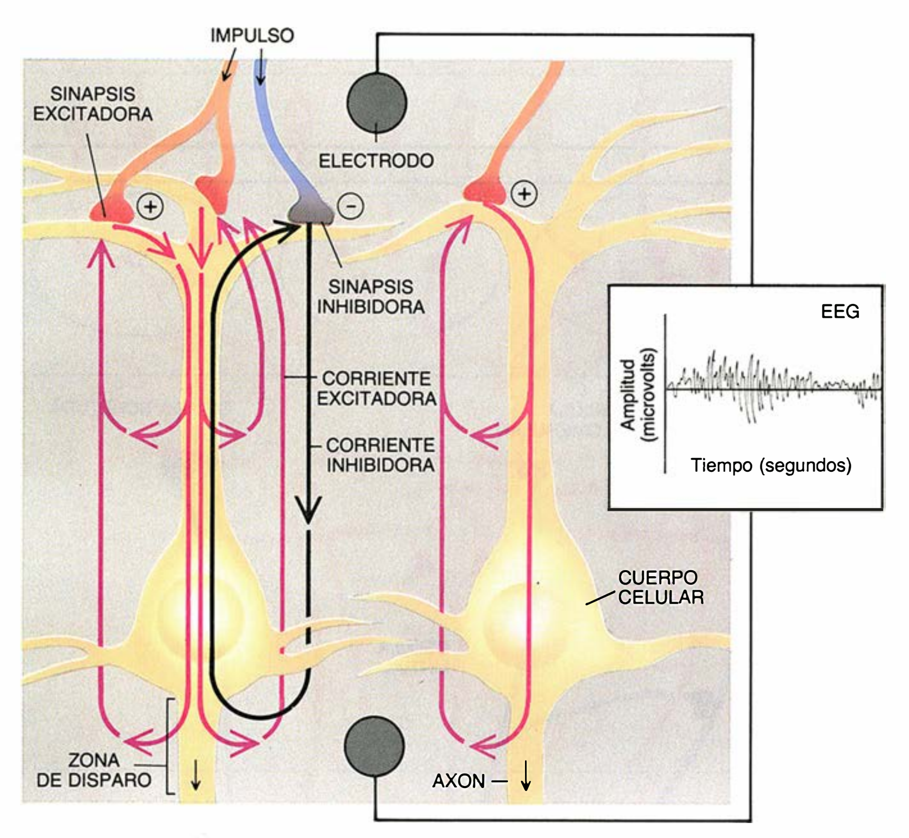
Curiosamente, no es la forma de la onda portadora la que revela la identidad de un olor. De hecho, la onda cambia de forma cada vez que el animal inhala, aunque el aroma aspirado sea repetidamente el mismo. La identidad de un olor sólo se puede discernir en la representación espacial de la amplitud de la onda portadora que recorre el bulbo entero.

Los patrones de amplitud se evidencian con nitidez cuando trazamos la amplitud media de las distintas versiones de la onda portadora en una cuadrícula que represente la superficie del bulbo. Los "mapas" recuerdan esos diagramas de contorno que perfilan las elevaciones de los montes y las honduras de los valles. Mientras no alteremos el entrenamiento del animal, obtendremos el mismo mapa cada vez que aspire un determinado aroma, aunque la onda portadora difiera a cada aspiración.

Estos mapas han servido de ayuda para demostrar no sólo que la percepción requiere la actividad global del bulbo entero, sino también que éste participa en el proceso de asignar significado a los estímulos. El mapa que representa la amplitud de la onda portadora de cierto aroma cambia bruscamente cuando alteramos el refuerzo asociado a ese aroma. Si el bulbo no hiciese que la experiencia



2. NEURONAS DEL SISTEMA OLFATORIO y su participación en la información a través de una tupida red de sinapsis, suerte de engarces en los que las señales van pasando de una neurona a otra. Por lo común, las señales pasan de unas prolongaciones celulares llamadas axones a otras llamadas dendritas; a veces, sin embargo, pasan de dendrita a dendrita o de axón a axón. La amplia participación lleva a una actividad colectiva. En este diagrama sumamente esquemático, la coloración roja significa que una neurona está excitando a otra, y la coloración negra que la está inhibiendo.



3. LAS ONDAS DEL EEG reflejan el promedio de excitación de los grupos de neuronas. En las sinapsis, los estímulos excitadores generan corrientes eléctricas que circulan en circuitos cerrados dentro de la neurona receptora, hacia su axón, a través de la membrana celular hasta el espacio extracelular y, en este espacio, de vuelta hacia la sinapsis (*flechas rojas*). Los estímulos inhibidores generan circuitos que se mueven en la dirección opuesta (*flechas negras*). En las células, la zona de disparo añade refuerzos a la corriente (reflejados en los cambios de voltaje al atravesar la membrana); si la suma es lo bastante positiva desencadena impulsos. Electrodos conectados al cerebro registran esas mismas corrientes cuando ya han salido de la célula. Los EEG resultantes indican la excitación de grupos enteros de células, no de neuronas individuales, porque las avenidas extracelulares de las que surgen los EEG llevan corrientes a las que han contribuido millares de células.

influyera en la percepción, el mapa permanecería inalterado después de haberse cambiado la asociación condicional.

Creemos que algo a lo que hemos dado el nombre de "asociaciones de neuronas" es, a la vez, un importantísimo depósito de las asociaciones pretéritas y un partícipe esencial en la formación del disparo colectivo o ráfaga del bulbo entero. La hipotética asociación consta de neuronas que otras han excitado simultáneamente durante el aprendizaje.

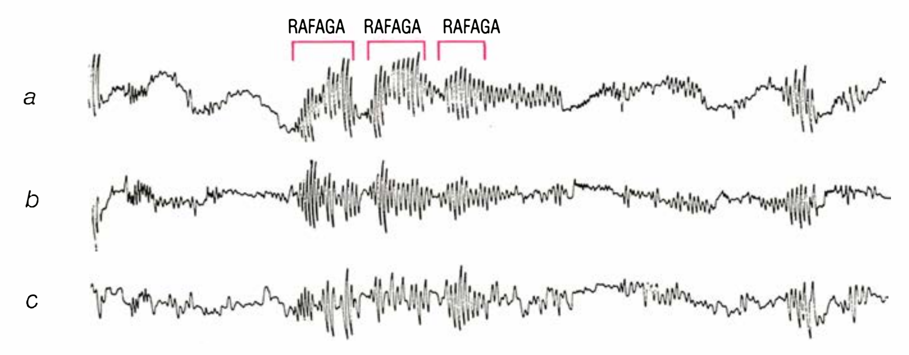
Hace ya más de 20 años, mis colegas y yo descubrimos que, cuando se entrena a los animales con técnicas de refuerzo para que distingan entre diferentes estímulos olfatorios, ciertas sinapsis que conectan neuronas dentro del bulbo y dentro del córtex olfatorio se consolidan selectivamente durante el entrenamiento. Es decir, la sensibilidad de las células postsinápticas al estímulo excitador –propiedad conocida como "ganancia"– crece en la sinapsis, de suerte que un estímulo genera una corriente dendrítica mayor que la que habría generado de no darse ese entrenamiento especial. La ganancia es la relación entre respuesta y estímulo: la intensidad neta de las corrientes dendríticas respecto al número de impulsos entrantes.

La potenciación no se produce en la sinapsis entre un axón de entrada (por ejemplo, un receptor perteneciente a la nariz) y la neurona a la que excita (por ejemplo una neurona bulbar), sino en la sinapsis entre neuronas interconectadas que, durante el aprendizaje, son excitadas a la vez por las neuronas de acceso. Las neuronas del bulbo y las del córtex olfatorio están conectadas a muchas otras en esas regiones.

Potenciación ya predicha por la regla de Hebb. Ampliamente aceptada, establece que las sinapsis entre neuronas que se disparen a la vez adquirirán mayor vigor, siempre que su sincrónico disparo vaya acompañado de una recompensa. (Hoy se sabe que, en el refuerzo, intervienen sustancias químicas "moduladoras" que el tallo cerebral envía al interior del bulbo y del córtex durante el reforzamiento.)

De nuestros datos inferimos que, cuando a un individuo se le refuerza para distinguir un olor, se forma una reunión o asociación de células nerviosas, integrada por neuronas conectadas según la regla de Hebb, para la detección de ese determinado aroma. Acto seguido, cuando cualquier subgrupo de neuronas de esa asociación recibe el estímulo familiar, la asociación entera puede llegar a estimularse rápidamente al difundirse a toda velocidad las señales excitadoras a través de las sinapsis hebbianas favorecidas. La asociación, a su vez, dirige al resto del bulbo hacia un determinado tipo de actividad.

Si estamos en lo cierto, la existencia de una asociación de células nerviosas contribuiría a esclarecer el problema de la distinción entre el primer plano y el trasfondo; aclararía también el problema de la generalización sobre receptores equivalentes. En el primer caso, la reunión conferiría estatuto de "adelantados" a los estímulos que la experiencia, almacenada en las sinapsis hebbianas, ha hecho importantes para el individuo. En el



4. REGISTROS SIMULTANEOS a partir del bulbo olfatorio (*a*) y de las partes frontal (*b*) y posterior (*c*) del córtex olfatorio de un gato, en los que pueden verse las ondas de baja frecuencia interrumpidas por "ráfagas" –oscilaciones de gran amplitud y alta frecuencia que se producen al percibirse los olores. La amplitud media de una ráfaga es de unos 100 microvolts. Cada una de ellas dura una fracción de segundo, correspondiente al intervalo que media entre inhalación y exhalación.

segundo caso, la asociación aseguraría que la información procedente de cualquier subgrupo de receptores, al margen de la posición que ocupen en la nariz, se difundiera inmediatamente por toda la asociación y, desde ella, al resto del bulbo.

Por importante que sea para la percepción, la asociación de células nerviosas no genera por sí misma las ráfagas de actividad colectiva del bulbo entero. Para que se produzca una de tales ráfagas en respuesta a algún aroma, es preciso que las neuronas de la asociación y de todo el conjunto del bulbo estén "preparadas" para responder con fuerza al estímulo.

Dos procesos complementan la preparación llevada a cabo por el desarrollo de las sinapsis hebbianas; ambos afectan a la ganancia, y lo hacen alterando la sensibilidad de las zonas de disparo, no las sinapsis. Aquí la ganancia es la proporción entre el número de impulsos disparados (salida) y la corriente dendrítica neta (entrada). Se llama ganancia total al producto de lo obtenido en las sinapsis y en las zonas de disparo.

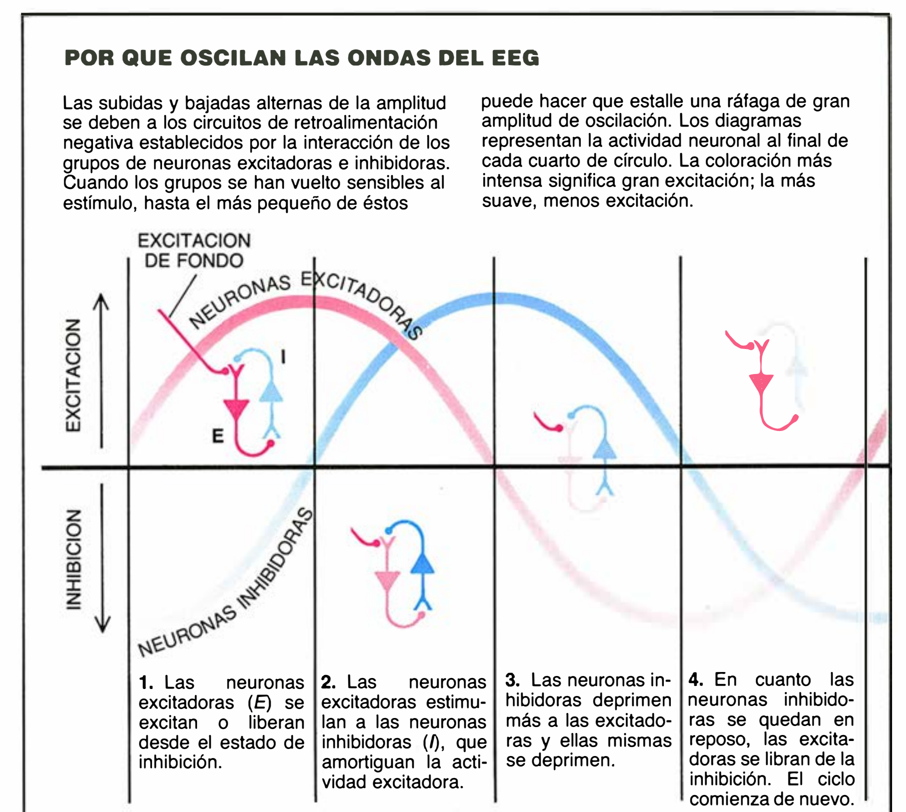
Un factor de preparación es la estimulación general. Nuestros experimentos patentizan que la ganancia de los grupos de neuronas se incrementa en el bulbo y en el córtex olfatorio cuando un animal está hambriento, sediento, excitado sexualmente o amenazado. Tal preparación parece deberse a axones que, desde otras partes del cerebro, liberan sustancias químicas moduladoras (distintas de las que intervienen en la formación de las sinapsis hebbianas).

El otro factor de preparación es el estímulo mismo. La excitación de las neuronas corticales aumenta su respuesta. Cada nuevo estímulo que reciben mientras permanecen excitadas incrementa notoriamente su rendimiento, prueba de que su ganancia ha crecido merced al estímulo. Este aumento se da sobre una determinada escala de estímulos. Si el estímulo neto es vigorosamente inhibidor, no se disparan impulsos. Por encima de algún nivel muy elevado de estímulo excitador, las neuronas se disparan con la mayor velocidad posible; en adelante, ya no serán capaces de dispararse más de prisa, aunque el estímulo aumente. Pero, en el amplio tramo intermedio, la salida de impulsos aumenta siguiendo una curva sigmoidea (esto es, en forma de S). La pendiente, o inclinación, de la curva refleja la ganancia.

Vale la pena resaltar el descubrimiento de que la ganancia, con la excitación, se incrementa. La mayoría de los modelos de las redes nerviosas dan por sentado que las neuronas logran su máxima ganancia cuando se hallan en reposo. Se supone generalmente que tanto la excitación como la inhibición aminoran la ganancia, de suerte que las redes neuronales se mantienen en constante estabilidad. Tales supuestos son inapropiados para el cerebro, pues no admiten que dichas redes generen cambios explosivos.

Parece, pues, que la información procedente de los aromas pasa de un corto número de receptores a un número aún menor de células del bulbo. Si el aroma es familiar y el bulbo ha sido preparado por la excitación, la información se transmite con la celeridad de un relámpago por la reunión de neuronas. Primero, el estímulo excitador que llega a una parte de la asociación durante una inhalación excita a las otras partes, vía sinapsis hebbianas. Inmediatamente, esas partes reexcitan a la primera, aumentando la ganancia, y así sucesivamente, con lo que el estímulo hace que estalle rápidamente la actividad conjunta de toda la asociación. A su vez, la actividad de la asociación se expande por el bulbo entero, desencadenando la explosión de una ráfaga global.

El bulbo envía, entonces, simultáneamente, por axones paralelos, una "notificación de consenso" hasta el córtex olfatorio. Lo que a continuación debe ponerse en claro es cómo esa área cortical distingue entre tal notificación de consenso y el trasfondo de otros estímulos que inciden en ella, desde el bulbo y desde otras partes.



POR QUE OSCILAN LAS ONDAS DEL EEG

Las subidas y bajadas alternas de la amplitud se deben a los circuitos de retroalimentación negativa establecidos por la interacción de los grupos de neuronas excitadoras e inhibidoras. Cuando los grupos se han vuelto sensibles al estímulo, hasta el más pequeño de éstos puede hacer que estalle una ráfaga de gran amplitud de oscilación. Los diagramas representan la actividad neuronal al final de cada cuarto de círculo. La coloración más intensa significa gran excitación; la más suave, menos excitación.

1. Las neuronas excitadoras (*E*) se excitan o liberan desde el estado de inhibición.

2. Las neuronas excitadoras estimulan a las neuronas inhibidoras (*I*), que amortiguan la actividad excitadora.

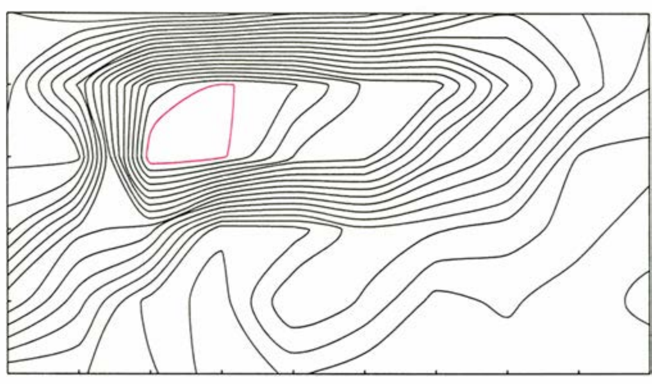
3. Las neuronas inhibidoras deprimen más a las excitadoras y ellas mismas se deprimen.

4. En cuanto las neuronas inhibidoras se quedan en reposo, las excitadoras se libran de la inhibición. El ciclo comienza de nuevo.

La respuesta tiene que ver, sin duda, con el tendido que conecta bulbo y córtex. El bulbo genera series de impulsos que corren simultáneamente a lo largo de los axones paralelos que conducen desde el bulbo hasta el córtex. Cada axón se ramifica mucho y transmite los impulsos a miríadas de neuronas por todo el córtex olfatorio; cada una de las células corticales que les sirven de diana recibe el estímulo procedente de miles de células bulbares.

La actividad transmisora de las líneas entrantes, que se sincroniza por cooperación, descuella probablemente porque esas señales se suman unas a otras; los estímulos no sincrónicos, cuyas frecuencia y fase no coinciden con las de los portadores de señales, se anulan entre sí. De este modo, cada neurona receptora del córtex olfatorio capta una porción de la señal bulbar cooperativa y transmite las señales sumadas a millares de sus vecinas simultáneamente.

En respuesta, las neuronas del córtex, masivamente interconectadas y

5. ONDA COMUN PORTADORA que emergió de 60 EEG registrados simultáneamente a partir del córtex olfatorio de un conejo mientras éste reconocía un olor (*izquierda*). La onda es la misma, pero su amplitud varía. La forma de la onda portadora no indica la identidad del olor. Esta información está contenida en el modelo espacial de la amplitud a través del córtex, que puede trazarse como una serie de contornos (*derecha*) muy similares a las líneas que señalan las cotas del relieve. El contorno de color representa la mayor amplitud; los siguientes, amplitudes cada vez menores.

que han formado sus propias asociaciones de células nerviosas, generan al instante su propia ráfaga colectiva, a no ser que tengan una onda portadora y un patrón de amplitud espacial que difiera de los que se dan en el bulbo. En esencia, la senda transmisora para el patrón global predominante en el bulbo depura el mensaje: elimina el "ruido" para que sólo la señal colectiva provoque al córtex olfatorio. Así como una ráfaga en el bulbo garantiza la entrega al córtex de un mensaje coherente, así también es de creer que el estallido global en el córtex hace que los mensajes que salen de esta región puedan mantenerse por encima del alboroto cuando llegan a otras regiones del cerebro.

Son muchas las razones por las que creemos que la actividad del cerebro es, durante las ráfagas y entre ellas, caótica y no meramente estocástica. Pero, antes de ahondar en esas razones, permítaseme aclarar un poco qué entiendo aquí por "caos".

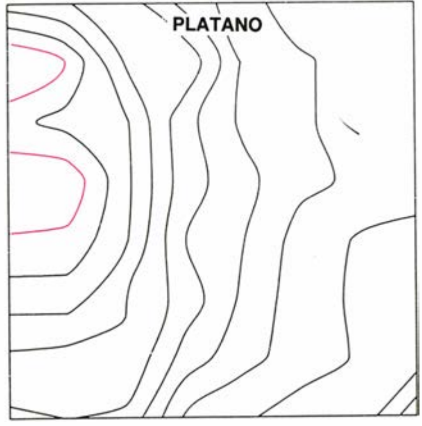
Aun a riesgo de incurrir en simplismo, me gusta a veces sugerir la diferencia entre caos y aleatoriedad comparando el proceder de la multitud que pulula a una hora punta por los andenes de una estación ferroviaria con el de una muchedumbre de gente aterrorizada. La actividad de los usuarios del tren se parece al caos en el hecho de que, si bien un observador no familiarizado con el espectáculo de las estaciones ferroviarias podría pensar que esas personas se agitan de acá para allá sin motivo o razón alguna, un orden subyace a la complejidad superficial: cada individuo se apresura por subir a un tren determinado. Bastaría con que se anunciara un cambio en los horarios de salidas para que muchas de esas personas cambiasen la dirección de sus pasos. En contraste con esto, la agitación histérica de una masa aterrorizada de individuos sólo consta de movimientos fortuitos: ningún simple anuncio podría hacerlos cooperar.

Uno de los primeros indicios que más nos convencieron de la presencia de caos fue que por todo el bulbo se daba una común onda portadora aperiódica (no repetitiva), no sólo durante las ráfagas, sino también entre ellas, aun cuando no hubiera estímulos extrabulbares que dirigiesen esta actividad colectiva. La falta de motivación externa significaba que tal actividad se generaba autónomamente en el bulbo. Semejante autoorganización es una de las características de los sistemas caóticos.

Otro indicio fue que los colectivos neurales del bulbo y del córtex tenían una notoria capacidad para saltar todos a la vez, y casi instantáneamente, desde un estado de no explosión al de explosión en ráfaga, y luego proceder a la inversa. A los rápidos cambios de estado los físicos los llaman "transiciones", y los matemáticos "bifurcaciones". Denominaciones aparte, los cambios llamativos en respuesta a un estímulo débil constituyen otro rasgo característico de los sistemas caóticos. La bifurcación es significativamente más difícil de controlar en los sistemas estocásticos.

Obtuvimos pruebas ulteriores del





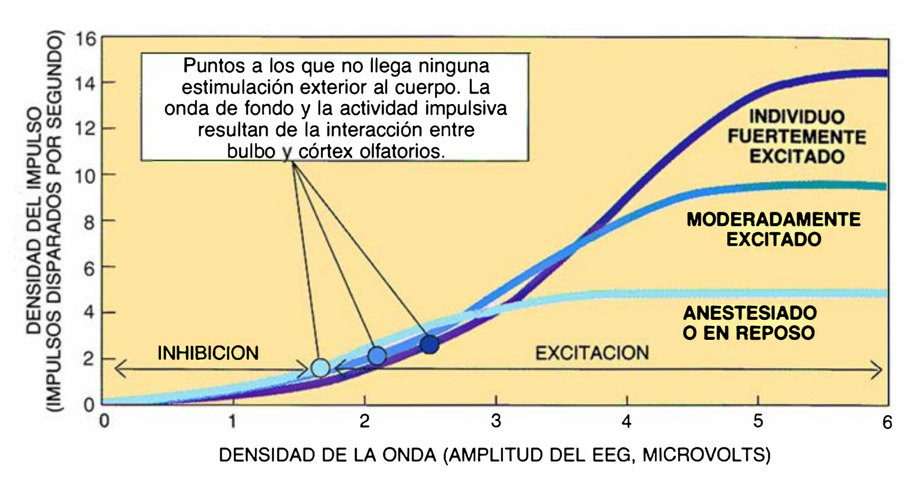


6. EL CONTORNO TRAZADO a la izquierda emergió con toda nitidez de los electroencefalogramas bulbares de un conejo al que se había condicionado para que asociara el olor del serrín con determinado refuerzo. Pero después de que el animal aprendiera a reconocer el olor de la banana (*centro*), la reexposición al serrín produjo un gráfico diferente del primero (*derecha*). El cambio demuestra que la actividad bulbar está dominada por la experiencia más que por los estímulos; de ocurrir lo contrario, el serrín daría siempre origen al mismo trazado. (Esquemas del autor del artículo.)

caos desarrollando modelos informáticos del sistema olfatorio considerado en su integridad: bulbo, córtex, conexiones entre uno y otro, más el estímulo hasta ambas áreas desde fuera del sistema. Simulamos la actividad del sistema resolviendo los sistemas de ecuaciones diferenciales ordinarias que describen la dinámica de los grupos locales de neuronas.

Demostramos, en primer lugar, que el modelo representaba con cabal exactitud el sistema olfatorio. Con un solo impulso (equivalente a la excitación de unos pocos receptores) para poner en marcha el sistema, el modelo mantenía una actividad que se parecía mucho a los EEG olfatorios periódicos.

Después de "entrenar" al modelo para que reconociese aromas específicos, el segmento bulbar generaba ráfagas en respuesta a estímulos seleccionados, y las ondas portadoras comunes que vibraban en esas ráfagas proporcionaban unos mapas de amplitud inequívocos y coherentes. Más aún, siempre que añadíamos un nuevo "aroma" al repertorio perceptual de nuestro hipotético sujeto, se producía un mapa de amplitud global que lo identificaba. Al mismo tiempo, los otros mapas cambiaban, como deberían cambiar, por descontado, en un auténtico sistema de memoria asociativa. Anteriormente, habíamos ya observado cambios parecidos en experimentos con animales, después de haberles enseñado a reconocer estímulos diferentes de aquellos con los que se habían familiarizado en un principio.



7. CURVAS SIGMOIDEAS que muestran la relación existente entre estímulo (densidad de la onda) y respuesta (densidad del impulso) en las zonas de disparo de poblaciones de neuronas. (Los trazados no son válidos para neuronas individuales.) La linealidad de la subida, en función del aumento de excitación, indica que la sensibilidad al estímulo –o ganancia (la razón de respuesta a estímulo, o la pendiente)– se agranda con la excitación. En cada caso, la ganancia va en aumento a medida que las neuronas que están ya excitadas (las que hay en los círculos y a su derecha) reciben más estimulación. El aumento de ganancia en función del estímulo es esencial para la formación de ráfagas.

Nuestro modelo suministró nuevas pruebas en favor del caos cuando logramos provocar EEG artificiales de ráfagas extendidas y de la actividad "entre ráfagas" que tenía lugar en los intervalos de una ráfaga a otra. Como los EEG artificiales duraban más tiempo que los normales, nos era posible trazar "retratos de fase" del comportamiento previsto del sistema olfatorio, tanto durante las ráfagas como entre ellas. Con sólo echar un vistazo a estos gráficos, se sabe si la dinámica podrá ser caótica.

Los detalles de cómo se elaboran tales "retratos" y por qué son un reflejo válido de la actividad global del sistema olfatorio resultan demasiado complejos para que los pormenoricemos aquí. No obstante, para aquellos lectores que estén familiarizados con los retratos fásicos, indicaré que los trazamos en un cuadriculado tridimensional y añadimos color con el fin de desplegar una cuarta dimensión. Cada eje representaba la amplitud EEG procedente de alguna parte del sistema olfatorio (bulbo o una subsección del córtex olfatorio). Una gama de colores del rojo al azul representaba de la amplitud mayor a la menor de las que procedían de una cuarta parte del sistema.

Un punto figuraba la conjunción de tres amplitudes medidas en un momento determinado. Luego, algo separado de él pusimos otro punto, que representaba lo que ocurría una milésima de segundo después; unimos los dos puntos con una línea coloreada. A continuación marcamos un tercer punto, y así sucesivamente. Hicimos rotar la imagen definitiva en el espacio para descubrir el enfoque más informativo.

Los gráficos así elaborados confirmaron la posibilidad de caos, pues las imágenes obtenidas semejaban bobinas sueltas de alambre con rizos de diferentes formas y colores. Si el modelo de sistema olfatorio hubiese funcionado al azar, no habría habido allí ninguna forma coherente, sino sólo manchas diseminadas por doquier, como la "nieve" que enturbia a veces la pantalla del televisor. Y, por otro lado, si el sistema fuese predecible en detalle, las estructuras serían más simples: parecerían una espiral, un círculo doblado o una rosquilla.

Las formas que encontramos representan atractores caóticos. Cada "atractor" es el comportamiento en el que el sistema se establece al sentir el influjo de un determinado estímulo, por ejemplo el de un aroma que le es familiar. Las imágenes sugieren que el acto de la percepción consiste en un explosivo salto del sistema dinámico desde la "cuenca" de un atractor caótico hasta la de otro; la cuenca de un atractor es el conjunto de condiciones iniciales a partir de las cuales el sistema sigue un determinado comportamiento. El fondo de una taza sería una cuenca de atracción para una bola situada en cualquier punto de las paredes de la taza. En nuestros experimentos, la cuenca de cada atractor la definirían las neuronas receptoras que se activaron durante el entrenamiento para formar la asociación o reunión de células nerviosas.

Pensamos que el bulbo y el córtex olfatorios mantienen muchos atractores caóticos, uno por cada aroma que el animal o el ser humano es capaz de distinguir. Cada vez que un aroma adquiere, por lo que sea, cierta significación, se añade otro atractor; todos los demás sufren entonces una ligera modificación.

La identificación del caos no nos revela automáticamente su origen. Sospechamos que surge en el cerebro cuando dos o más áreas, tales como el bulbo y el córtex olfatorios, cumplen al menos dos condiciones: se excitan una a otra con suficiente fuerza como para impedir que cualquiera de ellas quede en calma, y, al mismo tiempo, son incapaces de coincidir en una común frecuencia oscilatoria. La competición entre las partes aumentaría la sensibilidad y la inestabilidad del sistema, contribuyendo al caos. La importancia de la interacción entre el bulbo y el córtex se delata si desconectamos estas dos regiones: desaparece el caos y ambas se tornan anormalmente estables y quietas.

Los moduladores químicos introducidos en el sistema desde cualquier zona del cerebro crean también sensibilidad al estímulo, participando en la formación de las sinapsis hebbianas

de las reuniones de neuronas y aumentando la excitación. Como son varios los factores que mantienen una gran sensibilidad, cualquier señal muy pequeña –un olorcillo, un susurro, una visión instantánea– puede desencadenar un profundo cambio del estado colectivo.

Cabe pensar que el caos que hemos observado no pase de ser un inevitable subproducto de la complejidad del cerebro, con sus miríadas de conexiones. Pero los datos con que contamos sugieren que el caos controlado del cerebro es algo más que un subproducto accidental. Nada impide que constituya la principal propiedad por la que el cerebro se diferencia de una máquina de inteligencia artificial.

Una gran ventaja que el caos confiere quizás al cerebro es la de que los sistemas por aquél caracterizados produzcan continuamente nuevos patrones de actividad. Nuestra tesis afirma que tales patrones son importantísimos para el desarrollo de uniones de neuronas que difieran de las asociaciones establecidas. Más en general, la capacidad para crear patrones de acción está tal vez en la base de la capacidad del cerebro para generar la penetración intelectual y los "juicios" de tanteo y error que permiten solucionar un problema.

Hemos observado un comportamiento de rasgos caóticos y difundido por otras partes del cerebro. Este hallazgo no implica necesariamente que otros sistemas sensoriales funcionen de igual modo que el sistema olfatorio. Pero pensamos que así es. Lo mismo que otros investigadores, hemos documentado ráfagas gamma que cruzan amplias regiones corticales implicadas en el reconocimiento de las imágenes visuales. Igual que en el sistema olfatorio, los estímulos visuales familiares van asociados con mapas específicos de amplitud de las ondas transmisoras comunes. Puedo predecir que cuando alguien examine dibujos en los que el primer plano y el trasfondo sean ambiguos, de suerte que la percepción alterne entre dos imágenes, se hallará que los mapas de la amplitud también alternan.

Comienzo a vislumbrar en qué consiste la dinámica general de la percepción. El cerebro busca información, principalmente dirigiendo al individuo a que mire, escuche y aspire. La búsqueda es un resultado de la actividad autoorganizadora que se desarrolla en el sistema límbico (parte del cerebro que incluye el córtex endorrino y que, según se cree, interviene en la vida emocional y en la memoria), el cual envía una orden de búsqueda a los sistemas motores. Transmitida la orden de moverse, el sistema límbico despacha un mensaje de reaferencia, así se llama, alertando a todos los sistemas sensoriales para que se preparen a responder a la nueva información.

Y responden, participando todas y cada una de las neuronas de una región dada en una actividad colectiva, en una ráfaga. La actividad sincrónica de cada sistema se retrotransmite a continuación hasta el sistema límbico, donde se combina con la salida producida de manera similar por los otros sistemas, formando una "Gestalt". Inmediatamente, en una fracción de segundo, se demanda otra búsqueda de información, y los sistemas sensoriales se preparan de nuevo por reaferencia.

El estado de conciencia podría asentarse en la experiencia subjetiva de este proceso recursivo de orden motor, reaferencia y percepción. De ser así, capacitaría al cerebro para hacer planes y preparar cada acción subsiguiente basándose en la anterior, en la información sensorial y en la síntesis perceptiva. Resumiendo: un acto de percepción no es la mera copia de un estímulo entrante, sino un paso de un complejo trayecto a través del cual los cerebros se desarrollan, se reorganizan a sí mismos y entran en contacto con sus entornos para modificarlos en su propio provecho.

El poeta William Blake escribió: "Si las puertas de la percepción se purificaran, cada cosa aparecería ante el ser humano como realmente es: infinita." Tanta purificación no sería de desear. Sin la protección de las puertas de la percepción –esto es, sin la autocontrolada actividad caótica del córtex, de la que surgen las percepciones– a los animales y a las personas nos abrumaría la infinitud.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MASS ACTION IN THE NERVOUS SYSTEM: EXAMINATION OF THE NEUROPHYSIOLOGICAL BASIS OF ADAPTATIVE BEHAVIOR THROUGH THE EEG. Walter J. Freeman. Academic Press, 1975.

HOW BRAINS MAKE CHAOS IN ORDER TO MAKE SENSE OF THE WORLD. Christine A. Skarda y Walter J. Freeman en *Behavioral and Brain Sciences*, vol. 10, n.º 2, págs. 161-195; junio de 1987.

THE SYNAPTIC ORGANIZATION OF THE BRAIN. Tercera edición. Gordon M. Shepherd. Oxford University Press, 1990.

SYNERGETICS OF COGNITION: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM AT SCHLOSS ELMAU, BAVARIA, JUNE 4-8, 1989. Dirigido por H. Haken y M. Stadler. Springer-Verlag, 1990.

Ciencia y sociedad

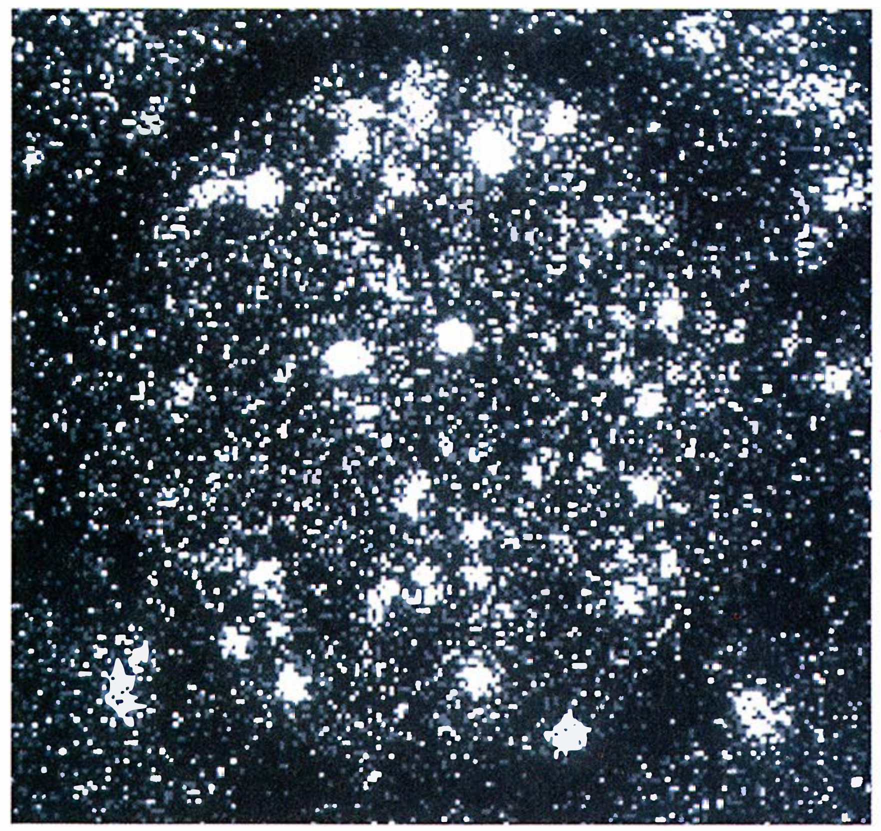
El misterio de la radiación de fondo

Hasta el polemista más empedernido estaría dispuesto a aceptar que el cielo, de noche, es oscuro. Siempre, claro, que el polemista no sea un astrónomo. En 1962 se descubrió que, observado a la luz de los instrumentos sensibles a los rayos X, el cielo resplandece con luminosidad brillante y uniforme.

No se ha encontrado todavía una explicación satisfactoria de ese fondo difuso de rayos X. Un 25 o 30 por ciento se atribuye a los cuásares, diminutos objetos cósmicos generadores de energía que se supone ocupan el centro de algunas galaxias. El origen del resto constituye un misterio reservado.

Dos descubrimientos recientes —uno basado en datos nuevos y otro en el análisis de registros anteriores— pueden resolver parte del misterio. Los nuevos datos vienen del *satélite Roentgen* o *ROSAT*, instrumento astronómico que opera en la banda de los rayos X. Desde su lanzamiento, hace unos nueve meses, el *ROSAT* ha estado observando el espacio con una sensibilidad y una resolución que supera los instrumentos de rayos X de los que se disponía hasta ahora.

Uno de los objetivos de esta observación ha sido separar el fondo de rayos X en sus componentes discretas y determinar su naturaleza. El 15 de enero, durante el transcurso del congreso anual de la Sociedad Astronómica Americana en Filadelfia, Joachim Truemper y Guenther Hasinger, del Instituto Max Planck de Física Extraterrestre, anunciaron que el *ROSAT* había encontrado muchos más cuásares de los detectados hasta la fecha: un centenar por grado cuadrado. Esta cifra implicaría la existencia de cuatro millones de cuásares en todo el firmamento, que darían cuenta del 40 por ciento del fondo de rayos X.



1. EL FONDO DE RAYOS X revela su amontonada naturaleza en esta imagen del ROSAT. *La mayoría de las 40 fuentes que se distinguen en esta imagen han sido identificadas como cuásares.*

Más intrigante resulta su detección de extensas zonas emisoras de radiación de rayos X que median entre las fuentes de dicha radiación. Hasinger y Truemper proponen que ésta la producen aglomeraciones de cuásares remotísimos, tanto que el *ROSAT* no puede distinguirlas una a una. Si se supone que la edad del universo es de 13.000 millones de años, las agrupaciones podrían distar entre 8000 y 10.000 millones de años luz de la Tierra y estarían separadas entre sí unos 15 o 30 millones de años luz.

He ahí un nuevo reto para los cosmólogos, que tienen ya bastante trabajo con explicar la evolución de grupos de galaxias desde una presumible explosión inicial. Sin embargo, la existencia de grandes agrupaciones organizadas de cuásares plantearía un problema para la cosmología de la gran explosión, el mayor de cuantos la atormentan.

Ahora bien, los cuásares sólo pueden dar cuenta del 50 por ciento del fondo de rayos X. En el congreso de Filadelfia, Antonella Fruscione, Richard Griffiths y John MacKenty, del Instituto de Ciencias Espaciales de Baltimore, presentaron una posible fuente del resto de rayos X. Al combinar datos antiguos del *Telescopio Einstein de rayos X* y del *Satélite Astronómico Infrarrojo* con medidas infrarrojas propias, sugirieron que el 30 por ciento o más de esta radiación procedía de galaxias que se significaban por una tasa alta de formación de estrellas.

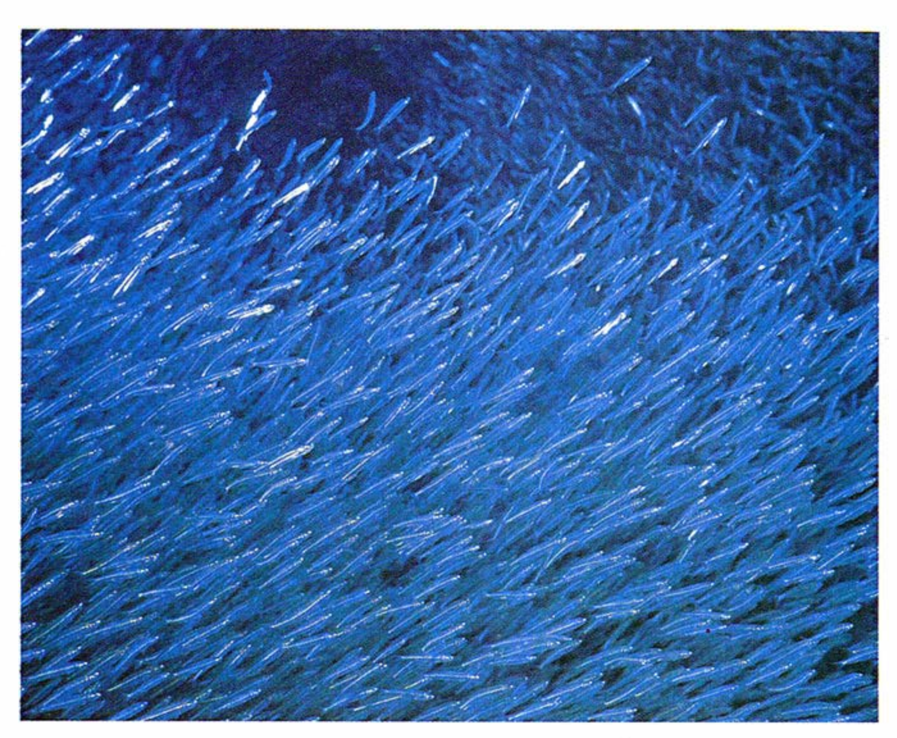
Algunas estrellas dobles de gran masa recién constituidas evolucionan hacia estrellas binarias de rayos X, sistemas en que un objeto —sea una estrella de neutrones o sea un agujero negro— consume lentamente a su compañero, emitiendo rayos X. En consecuencia, estas galaxias podrían ser unos potentes emisores de rayos X, y, un gran número de estos objetos repartidos en el espacio, causar la radiación observada.

Para Stephen S. Holt, del Centro Goddard, quedan muchas cuestiones por resolver a propósito de la radiación de fondo de rayos X. Holt, investigador principal del proyecto *ROSAT*, señala que el espectro de esta radiación a longitudes de onda muy cortas difiere del espectro de los cuásares; por tanto, los cuásares nada

tendrían que ver con esa componente. Las galaxias que antes citábamos, en cambio, sí pueden dar cuenta de la radiación. De cualquier modo, los resultados del *ROSAT* no permiten saber si las zonas de radiación de rayos X están formadas por galaxias o por agrupaciones de cuásares.

Podría ocurrir que se tratara de otra cosa, que las agrupaciones no estuvieran necesariamente formadas por objetos condensados. De hecho, el espectro de la radiación de fondo de rayos X se parece a la que emerge de un gas caliente y tenue. Otro satélite, el *COBE* (*Explorador del Fondo Cósmico*), no encontró señales del gas, aunque si éste se concentra en volúmenes pequeños el *COBE* será incapaz de detectarlo.

Podría suceder, en definitiva, que las observaciones del satélite *ROSAT* de regiones de radiación de rayos X correspondan a acumulaciones de gas caliente, y no a cúmulos de cuásares.



2. ABICHONES ATLANTICOS, cuyo sexo puede ser determinado por la temperatura del agua, que varía en función de la estación y la latitud. Foto: Al Grotell.

El sexo y los aterínidos

Un pececillo plateado y delgado ha ofrecido, recientemente, la primera prueba de una vieja teoría. Propuesta en 1930 por Ronald A. Fisher, explica por qué la mayoría de especies producen un número igual de crías macho y hembra, una proporción de sexos de 0,5. Nadie se había decidido a comprobarla, realmente, hasta que se reclutó el abichón, un aterínido atlántico.

Utilizando estos peces de cebo, David O. Conover, profesor de oceanografía en la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, demostró la validez de la teoría de Fisher. De forma empírica, creó su modelo del proceso de evolución hacia esta proporción.

Verificar la teoría de Fisher, después de 60 años, no es un mérito chico: la idea constituye el núcleo sobre el que pivota toda teoría relativa a la proporción de los sexos. Fisher describió lo que se daría en llamar "selección dependiente de la frecuencia". Expresado de una manera más sencilla, aunque el propio Fisher no lo planteara de forma simple, cualquiera que sea el sexo minoritario su demanda como pareja sexual será también elevada. Esta ventaja favorece la supervivencia de los genes que producen este sexo, lo que en último término corregirá cualquier desequilibrio de los sexos en la población.

El abichón era un individuo perfecto para someter a prueba la teoría. En los aterínidos el sexo viene determinado, en parte, por la temperatura del agua cuando nacen las crías. Las temperaturas bajas, al principio de la estación reproductora, producen hembras, y las temperaturas superiores de los estadios más avanzados de la época de reproducción determinan machos. Los abichones atlánticos procedentes de distintos lugares de la costa frezan a diferentes temperaturas, fenómeno que refleja variaciones estacionales y geográficas. A lo largo de una estación de reproducción entera, la proporción de machos a hembras alcanza un equilibrio de uno a uno.

Para comprobar el principio de Fisher, Conover y su colega David A. Van Voorhees forzaron el termostato. "Podemos ajustar las clavijas del sistema poniendo estos peces en un ambiente artificial, donde la temperatura persista constante", explica Conover. Los investigadores llevaron a cabo el seguimiento de peces capturados en distintos puntos de la costa atlántica, que se mantenían en depósitos de laboratorio a temperatura constante y a lo largo de varias generaciones.

Si la teoría de Fisher no fuera cierta, las temperaturas constantes deberían producir lotes de peces todos machos o todos hembras. En cambio Conover encontró que los sexos aparecían muy pronto en la proporción de uno a uno. Una población de Carolina del Sur, mantenida a una temperatura alta constante, alcanzaba la proporción de 0,5 después de cuatro generaciones. Peces de Nueva York, mantenidos igualmente a temperatura elevada, llegaron a ese equilibrio al cabo de una generación. En cada caso, la proporción de 0,5 se alcanzó porque el sexo que estaba en minoría aumentó en la generación siguiente: exactamente lo que había predicho Fisher.

James J. Bull, de la Universidad de Texas, y Eric L. Charnov, de la de Utah, proponen una explicación sobre el papel del ambiente de producción en la evolución de la proporción de los sexos. Ciertas temperaturas, por ejemplo, mejoran la eficacia de un sexo sobre el otro. En efecto, Conover ha demostrado que las hembras de abichón atlántico se benefician más que los machos de un período de crecimiento más largo. Puesto que las hembras mayores son más fértiles que los machos de mayor tamaño, es lógico que, en la temporada de crecimiento, dichas hembras se desarrollen primero de manera que puedan comer durante más tiempo. En cambio los machos no mejorarían de modo apreciable su habilidad reproductora aunque comieran más.

Además de proporcionar a la teoría de Fisher algunos puntos de apoyo, los hallazgos de Conover exploran el

control genético del sexo frente al control del ambiente en algunas especies. Para los biólogos este tema se ha convertido en uno de los más interesantes en el contexto por la preocupación del efecto de invernadero. Muchos han afirmado que las especies cuyo sexo está determinado por la temperatura podrían ser eliminadas si el clima cambiara de forma espectacular.

La genética, y no el ambiente, resultó ser el factor decisivo en la determinación del sexo de los aterínidos obtenidos en Nueva Escocia. Allí la temperatura natural es siempre fría. La proporción de uno a uno se mantuvo constante, con independencia de las condiciones del laboratorio. Conover y otros están estudiando ya el componente genético preciso de la determinación del sexo.

Los hallazgos en los abichones sugieren que en los casos en que los factores genéticos pueden ajustarse o compensarse los cambios ambientales podrían ser superados. Pero el caldeamiento global puede destruir especies cuyo componente genético del sexo sea débil, como ocurre en los reptiles. Las tortugas podrían verse gravemente amenazadas.

Y son las tortugas las que ponen en cuestión la teoría de Fisher que se acaba de confirmar. Estos reptiles violan, tal parece, la proporción de uno a uno entre los sexos, sin que nadie sepa la razón. Después de más de 10 años trabajando con tortugas, James J. Bull tiró la toalla. "Me dediqué a los bacteriófagos, ante mi impotencia por dar respuesta a esa cuestión", confiesa.

Un solo de ordenador

En el Japón, donde las rígidas jerarquías imprimen carácter y se desaconseja romper moldes, Toshio Shimada abomina la masa. Se ha jugado su carrera prometedora apostando por un proyecto radical de arquitectura y programación de un ordenador de muy altas prestaciones.

Está al frente de la sección de arquitectura de ordenadores del laboratorio electrotécnico de Tsukaba, la ciudad japonesa de la ciencia que se nutre de fondos públicos. Y aun cuando su jugada técnica venza, deberá domeñar un obstáculo imponente: convencer a los fabricantes japoneses de superordenadores para que ponga en práctica la idea de la computación paralela con "flujo de datos".

Shimada no sintió siempre la necesidad de alejarse del montón. Como muchos jóvenes japoneses, cultivó el gusto por las matemáticas en la escuela elemental y brilló en sus años de segundo ciclo en la universidad más respetada del Japón, la de Tokio. No acababan de satisfacerle sus estudios de ingeniería de control industrial y se pasó a la informática.

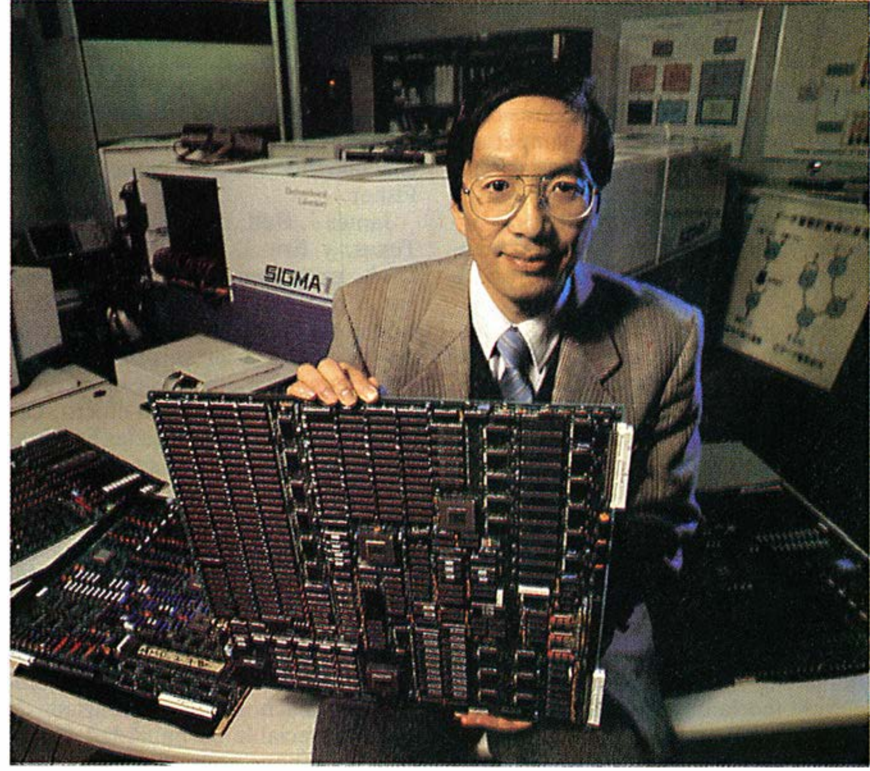
Con su título de licenciado en matemática en el bolsillo, Shimada ingresó en el Laboratorio Electrotécnico, el centro de investigación más sólido de su país. Preocupaba allí el futuro a largo plazo —y los potenciales cuellos de botella— de los superordenadores de altas prestaciones. Shimada se puso de inmediato a trabajar sobre las posibilidades de los ordenadores en paralelo, que se basan en múltiples procesadores elementales que operan armónicamente para resolver un problema. Se confía en que éstos realicen los cálculos complicados más deprisa que los ordenadores al uso, en los que un procesador se encarga de todas las operaciones en serie.

El fogonazo deslumbrador que centró su carrera se produjo unos dos años más tarde. Pasó el año 1980 en el Instituto de Tecnología de Massachusetts trabajando con Jack B. Dennis y su colaborador Arvind. En Cambridge, Shimada quedó impresionado por la atmósfera informal, que contrastaba de plano con el riguroso sistema de antigüedad vigente en las universidades y empresas japonesas.

Pero, sobre todo, le fascinó un enfoque calculatorio, llamado flujo de datos, que había sido propuesto varios años antes por Dennis y Arvind. "Estaban haciendo un trabajo muy creador", recuerda con entusiasmo. Para Shimada, la técnica de flujo de datos era "muy limpia y muy clara".

De vuelta al Japón, se puso manos a la obra: traducir a los ordenadores reales el flujo de datos. "Adiviné que podríamos proyectar una disposición sencilla para ejecutar el modelo". Aunque algunos grupos de EE.UU. y Europa habían intentado construir prototipos de flujo de datos, el proyecto de Shimada se convirtió en el más ambicioso de todos.

En una pizarra de su despacho, Shimada traza un diagrama del flujo de datos que se parece a una reacción en cadena al revés, comenzando con muchos átomos hasta condensarse en uno. En su modelo, cada átomo es un nodo, o elemento de procesado unido a una unidad de memoria. Al converger dos piezas de datos en cada nodo, éste se "dispara", llevando a cabo un cálculo específico y generando un resultado. Número que, a su vez, se convierte en una entrada para el siguiente nivel de nodos.



3. TOSHIO SHIMADA, proyectista de ordenadores del Laboratorio Electrotécnico del Japón, sostiene una tarjeta de su SIGMA-1, ordenador de proceso paralelo. La máquina se basa en un modelo computacional de flujo de datos. Foto: Dennis Gray.

Shimada no es el único empeñado en construir un ordenador paralelo. Ingenieros de ordenadores de otros países están canalizando sus esfuerzos hacia arquitecturas paralelas. La diferencia clave reside en los modelos computacionales o calculatorios en que se basan los diversos sistemas. El modelo que se escoge resulta determinante, al condicionar la manera en que un programador debe escribir su secuencia para sacarle el máximo provecho de la máquina.

El modelo computacional que goza de mayor aceptación es el esquema paralelo de datos que emplean varias compañías (Thinking Machines Corporation de Cambridge, por ejemplo). En esos ordenadores, cada procesador real o "virtual" (que existe lógica pero no físicamente) se asocia con un dato. Se transmite una instrucción única a todos los procesadores, y éstos operan con su conjunto local de datos.

Shimada argumenta que el modelo de flujo de datos evita limpiamente ciertos problemas con que se encuentran los enfoques paralelos. Por ejemplo, el de la coordinación de las operaciones de muchos procesadores. El flujo de datos obvía la sincronización porque los nodos se disparan en cuanto han recibido dos entradas. Shimada concede, a pesar de todo, que convertir el flujo de datos en sistema real no es tarea sencilla.

La construcción del equipo le ha llevado buena parte de los últimos diez años. Hay dos prototipos de ordenadores de flujo de datos instalados en su despacho. Ocho armarios metálicos blancos, dispuestos en cuadrado y conectados mediante cintas de cables a un armario central, alojan el SIGMA-1. A menos de tres metros hay un armario menor; se lee "Prototipo EM-4". Físicamente menor, pero más potente desde el punto de vista de cálculo; EM-4 es la segunda generación de SIGMA-1.

Shimada y sus colaboradores comenzaron a construir SIGMA-1 en 1982, financiados por el Proyecto Nacional del Superordenador auspiciado por el Ministerio de Industria y Comercio Exterior (MITI). La máquina consta de 128 procesadores, cada uno de ellos con una velocidad máxima teórica de 3,3 millones de operaciones en coma flotante por segundo (megaflops). El EM-4 está equipado con 80 procesadores construidos expresamente, cada uno con una velocidad máxima teórica de 12,5 millones de instrucciones por segundo. Se espera ampliar la capacidad máxima hasta su límite proyectado de 1024 procesadores para 1993.

Las máquinas tardarán en salir del laboratorio. Falta por elaborar el soporte lógico EM-4. Por su parte, SIGMA-1 ha dado un promedio de 100 megaflops — menos de una cuarta parte del total de su velocidad teórica máxima— en programas de prueba en código de máquina, los únicos programas cifrados que ha realizado. En consecuencia, el desarrollo del soporte lógico se ha convertido en una de sus más urgentes tareas pendientes. El objetivo actual de Shimada es "confeccionar un programa práctico en gran escala para SIGMA-1 de aquí al otoño de 1991". Y añade: "Eso espero".

Shimada concede que trabajar durante diez años en un sistema de computación que todavía ha de ejecutar un programa práctico puede resultar decepcionante. Su grupo ha dedicado cinco años a desarrollar un compilador de flujo de datos, soporte lógico que traduce los programas a código binario. Ni siquiera después de escribir 100.000 líneas de código en el lenguaje del ordenador, llamado "C", el compilador está todavía listo. "Nuestro grupo es pequeño, diez personas, de modo que es muy difícil trabajar al mismo tiempo en la arquitectura y en el soporte lógico", se justifica.

En medio de todo, Shimada sabe que juega con ventaja sobre muchos científicos de otros países: la financiación a largo plazo asegurada por el MITI. "Cuando se inicia un proyecto, tenemos muchas preocupaciones", dice. "Pero una vez que el proyecto ha comenzado, está casi garantizado que puede continuar durante cinco o seis años. Eso es muy importante". En los Estados Unidos, observa, los científicos tienen que estar demostrando cada pocos años que obtienen resultados para obtener financiación.

A pesar de reticencias y objeciones, los fabricantes japoneses de superordenadores comienzan sus primeros pasos hacia equipos paralelos, comprobando, verbigracia, los diseños de circuitos integrados. Se avanzará con mayor resolución gracias al Nuevo Proyecto de Tecnología del Proceso de Información, que ha dictado el MITI. Shimada cree que, con el tiempo, llegará la época de los ordenadores de flujo de datos. Paseándose ante su pizarra de plástico blanco, rotulador de fieltro en mano, esboza planes para su nuevo ordenador de flujo de datos, el sucesor del EM-4. Será un monstruo de máquina, gobernando 10.000 a 20.000 procesadores. Predice que hacia 1996, más o menos, tal ingenio alcanzará velocidades de alrededor de un billón de operaciones por segundo.

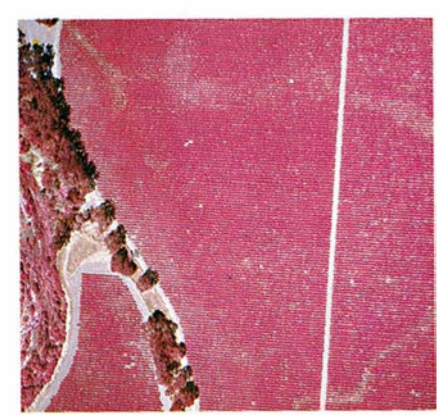
Ciencia y empresa

¿Vuelve la filoxera?

Ha vuelto. No a Europa. Azota de nuevo a los Estados Unidos. El áfido que devastó los viñedos mundiales en el siglo XIX torna a arrasar los campos de California. Sólo en los condados de Sonoma y Napa sucumbirán, de aquí a diez años, más de 20.000 hectáreas. La filoxera avanza por las regiones vinateras de la costa del Pacífico.







1. LA PLAGA SE EXTIENDE por los viñedos del Valle Napa. Estas imágenes infrarrojas muestran el ataque de filoxera en 1979, 1986 y 1987.

Podría haber llegado, pues, el momento para el cultivo de tejidos vegetales. "Hacemos en un año lo que se tarda cinco con los métodos tradicionales de sustitución", declara James A. Stamp, de Agritope, joven empresa de biotecnología. La firma espera que su método de multiplicar renuevos —que, como los ojos de la patata, se programan para convertirse en réplicas exactas de la planta original— alcanzará su máximo esplendor mucho tiempo después de que se haya acabado con la filoxera.

En la propagación clásica, se injerta un tallo fecundo a un rizoma y el injerto se planta nuevamente. Los europeos empezaron a usar esta técnica en los años sesenta del siglo pasado, cuando observaron que ciertas especies silvestres resistían el asalto de la filoxera. La cepa más resistente resultó ser *Vitis riparia*, nativa de la parte oriental de los EE.UU., de donde se cree que procede también el insecto. Los viñedos europeos están plantados casi exclusivamente de *riparia* o especies parientes y resisten a la filoxera.

No así en California. James A. Wolpert, viticultor de la Universidad de California en Davis, admite: "Hemos estado confiando en sarmientos que creíamos resistentes, aunque la mayoría de fuera lo negaran". Desde los años cincuenta, la escuela de agronomía ha recomendado una cepa híbrida, AXR1, mitad *V. vinifera*, la clásica vid europea, mitad *V. rupestris*, la especie resistente. Pero está perdiendo la batalla ante la nueva variedad de insecto.

Es incluso su alimento preferido, a dos metros y medio bajo el suelo. Mientras se la come, inyecta una toxina que produce la formación de vesículas del tamaño de una cabeza de alfiler. La raíz acaba cortada, privando a la planta de nutrientes y agua.

Para Agritope, el desastre que se avecina constituye su oportunidad de entrar en acción. "Los viveros tradicionales no pueden entregar con la prontitud deseada las plantas resistentes. No puedo encargar lo que quiero", se queja Chuck Wagner, apoderado general de Caymus Vineyards, famosa por su cabernet sauvignon. La situación es todavía peor para otros bodegueros, que habrán de esperar hasta 1994 para recibir sus cepas mejoradas.

"Con cultivo de tejidos, podría obtenerse dos o tres millones de esquejes de una sola cepa si uno quisiera", frente a los cien anuales que ofrece el método tradicional, indica Stamp. Agritope tiene clónicos de 30 cepas en su invernadero-laboratorio. Hay combinaciones de cuatro especies resistentes, entre ellas *V. riparia* y *V. rupestris*, y otras dos nuevas de Europa oriental.

Cada renuevo tomado de una cierta longitud de sarmiento se esteriliza. Después se cultiva durante algunas semanas en una cámara de crecimiento acondicionada hasta que produce un vástago con varios nódulos. Los brotes se cortan en secciones, cada una de las cuales posee un renuevo que produce otro brote, y así sucesivamente.

Después de la multiplicación, los tejidos pasan al invernadero, donde se plantan en viveros; la alimentación, la luz y el calor promueven un crecimiento rápido. A los cuatro meses de abandonar la cámara acondicionada, los vástagos fértiles se injertan en jóvenes rizomas. Como se liga tejido verde con tejido verde, el injerto se cierra antes que si fuera leñoso. Las plantas crecen durante algunos meses y después quedan en estado latente, de la misma manera que lo harán en el campo en invierno. Las plantas latentes son menos frágiles para su transporte.

"No se trata sólo de que puedan o no multiplicarse", afirma Wolpert, que pone en duda que las plantas procedentes de cultivo de tejidos desarrollarán raíces profundas para soportar la sequía en los primeros años de crecimiento. Pero, plagas aparte, el cultivo de tejidos está entusiasmando a sus promotores. Como el proceso es estéril, las plantas se hallarán exentas de enfermedades. Las clónicas son, por definición, copias exactas de un tipo, atributo apreciado por los bodegueros obsesionados por la constancia de sus características.

Superconductores para la mente y el corazón

Antes de doblar el siglo, los médicos podrían sumar, a las rutinas de observación general (el "chequeo"), la determinación de la salud del cerebro. Deberemos avance tan importante a unos diminutos sensores que miden la actividad de las neuronas. Llamados dispositivos superconductores de interferencia cuántica (DSIC, o SQUIDS en la abreviatura in-

glesa), los aparatos son muy sensibles, capaces de detectar los pequeñísimos campos magnéticos que se hallan en el corazón, cerebro y otras zonas del cuerpo que generan electricidad. A diferencia de otras técnicas de obtención de imágenes, que bombardean al paciente con radiación, los DSIC son sensores pasivos.

Aunque sometidos a prueba hace veinte años, la comunidad médica se mostró reacia a su aceptación. Eran ciertamente costosos. Estaban hechos de niobio, elemento superconductor que hay que enfriar hasta cuatro kelvins con helio líquido. Sólo unas pocas compañías, entre ellas la Siemens alemana y la norteamericana Biomagnetic Technologies Incorporated, desarrollaron tales biomagnetómetros para la investigación médica.

Las aplicaciones médicas pueden recibir ahora un fuerte impulso gracias a los progresos registrados en superconductividad a altas temperaturas. A lo largo del último año y medio, investigadores del Centro Thomas Watson, de IBM, y de la Universidad de California en Berkeley han construido magnetómetros DSIC usando películas muy finas de materiales superconductores a alta temperatura de itrio-bario-óxido de cobre o de talio- bario-calcio-óxido de cobre.

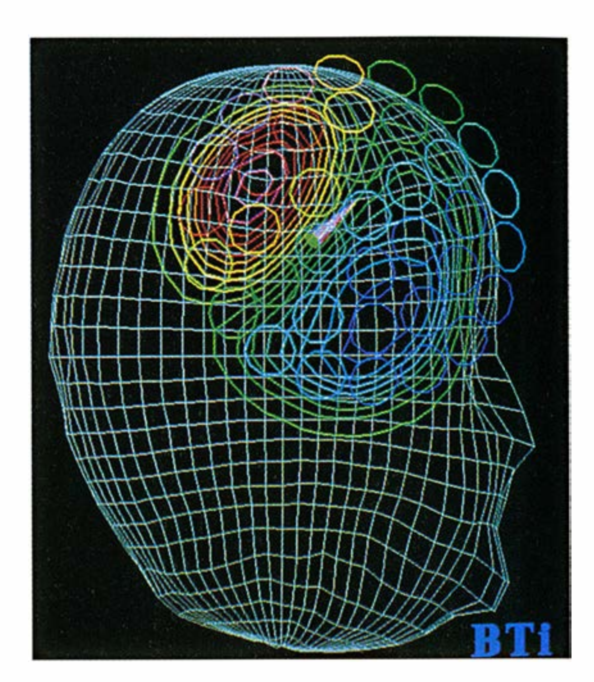
Estos materiales se hacen superconductores a la temperatura del nitrógeno líquido, los benignos 77 kelvins. En vez de sumergirse en un depósito de helio líquido y colocarse sobre la cabeza del paciente como un aparato de rayos X, los DSIC de alta temperatura permiten crear un casco u otro soporte apropiado de los sensores que se adapte a la forma de la cabeza.

Con esa suerte de "gorro pensante" calado en la testa del sujeto, los científicos compararán la actividad nerviosa de las diferentes partes del cerebro, permitiéndoles cartografiar el soporte de funciones mentales de orden superior.

Las líneas de montaje para los DSIC de alta temperatura están todavía a años de distancia. Sólo un 10 por ciento, si llega, de los aparatos construidos hasta ahora por los dos grupos norteamericanos de investigación son viables. Además, el alto nivel de ruido a temperaturas elevadas puede ser un obstáculo. Siemens, que fabrica un magnetómetro enfriado con helio líquido, ha decidido no continuar el desarrollo de los DSIC de alta temperatura por su baja relación de señal a ruido. Presume que pueden lograrse muchos de sus beneficios con distribuciones de 37 sensores de baja temperatura.

Antes de que la representación biomagnética se convierta en una prestación más de los hospitales, los creadores deben facilitar la interpretación de los datos de los magnetómetros. Las líneas equiescalares del campo magnético —que se parecen a un mapa topográfico de las Montañas Rocosas— requieren especialistas para descifrarlas. Una vez obtenidas las coordenadas de la fuente del campo, se superponen a una imagen de resonancia magnética para visualizar las regiones donde los nervios desarrollan actividad eléctrica.

Los biomagnetómetros actuales se usan sólo para investigación básica y clínica. Los DSIC constituyen, sin embargo, y así se ha comprobado, un método no invasor para determinar la localización de ataques epilépticos antes de la cirugía para eliminar la parte afectada del cerebro. La epilepsia por sí sola no impulsará la exploración biomagnética hasta la corriente médica principal, ya que esa enfermedad admite tratamiento medicamentoso. Pero los primeros descubrimientos sugieren que la técnica sirve para detectar anomalías en los campos magnéticos de los cerebros de pacientes con la enfermedad de Alzheimer.



2. CONSTRUCCION ELECTROMAGNETICA de imágenes: representa un campo magnético generado en el cerebro. Los dos conjuntos de anillos concéntricos se encuentran donde el campo entra y sale. La actividad del nervio se desarrolla en el vértice del cono entre los anillos. Los círculos en la vecindad del campo representan la posición de los sensores. Fuente: BTI.

Podría también ayudar a identificar la causa de arritmias y otros trastornos cardiacos sin tener que insertar un catéter en el corazón. El biomagnetismo, además, echa una mano a los psicólogos cognoscitivos. Desde 1975, Samuel J. Williamson, físico, y Lloyd Kaufman, psicólogo, ambos del departamento de neurología de la Universidad de Nueva York, han usado magnetómetros de baja temperatura para cartografiar las funciones sensoriales del cerebro. Así localizaron el primer mapa tonal en humanos. Tras la Universidad de Nueva York, son ya 50 laboratorios alrededor del mundo los que están utilizando el biomagnetismo para estudiar el funcionamiento sensorial.

Combustión exhaustiva

Desde hace 60 años, el hidrógeno viene siendo "el combustible del futuro". Se obtendría una provisión inagotable de este elemento combustible descomponiendo el agua en sus constituyentes y el combustible no contaminaría. Pero los defensores están todavía esperando. Aunque funciona bien en industria aerospacial, el hidrógeno trae demasiados problemas en el transporte terrestre. De volumen excesivo en su forma gaseosa, sólo se licúa a −253°C. La oferta actual de hidrógeno, obtenido primordialmente del gas natural, cuesta cuatro o cinco veces más que la gasolina.

Pero el hidrógeno puede todavía optar entre los combustibles para vehículos. No por sí solo, sino como aditivo; de manera muy parecida al alcohol que se añade a la gasolina en la mezcla gasohol. Mezclando un poco de hidrógeno con gas natural comprimido (GNC), sacaríamos el combustible alternativo más limpio de todos, dice Frank E. Lynch, presidente de Hydrogen Consultants.

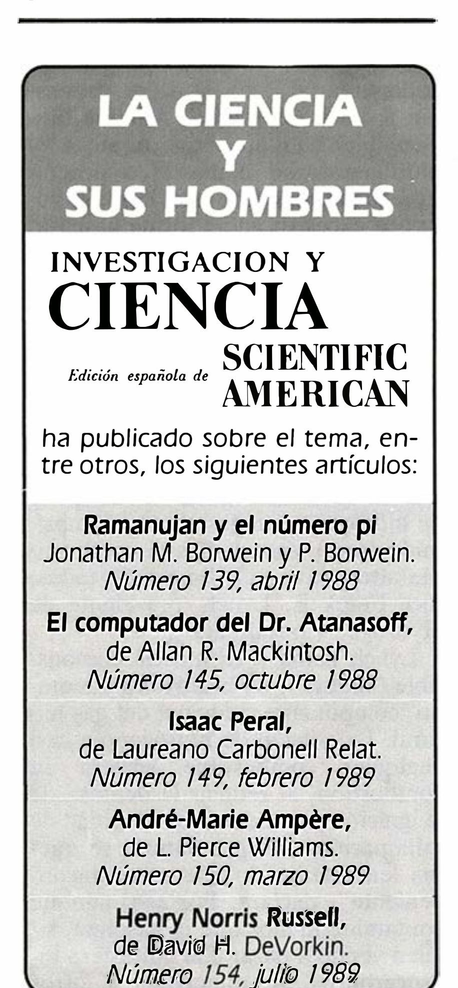
Lynch llama a su mezcla combustible "hitano", de hidrógeno y metano, componente principal del gas natural. La adición de hidrógeno a casi cualquier combustible acelera su combustión, al reducir la demora de la ignición y aumentar la velocidad de inflamación. "El gas natural se quema lentamente, lo que es un inconveniente", declara. Por eso, aunque contamine menos que la gasolina, siguen yendo a parar a la atmósfera hidrocarburos no quemados y otros

productos secundarios. Un arranque más precoz y una combustión más eficaz rebajarían las emisiones.

En enero se inició una prueba de viabilidad del hitano —5 por ciento de hidrógeno en contenido de energía y 15 por ciento en volumen— en la propia camioneta de Lynch, trucada para funcionar con gasolina o con hitano. Comparada con una camioneta alimentada por GNC, las pruebas oficiales confirmaron el buen rendimiento del hitano. Las emisiones de hidrocarburos fueron menos de la mitad que las del GNC y cayeron en una cuarta parte los niveles de óxido de nitrógeno. Sin embargo, la emisión de monóxido de carbono fue menor en el GNC, 0,053 frente a 0,99 gramos por kilómetro.

La ciudad de Denver, en el estado de Colorado, está impaciente por someter a ensayo experimental la idea de Lynch. Pese a todas las medidas municipales, hay días en que un manto de humo pardo viola las normas federales de contenido de monóxido de carbono y partículas. La ciudad tiene ya un amplio proyecto de combustibles sustitutorios, con camiones y camionetas que se mueven con GNC. "Vamos a probar todos los vehículos que podamos con hitano", dice Steven J. Foute, director de programas de medio ambiente. El Auto Oil Consortium de Detroit, que agrupa a tres grandes empresas de automóviles y a 14 compañías petroleras en un mismo propósito de búsqueda de combustibles sustitutorios, se propone someter a prueba el hitano dentro del presente año. En ese mismo empeño se hallan la Universidad estatal de Colorado y la Comisión de Recursos Atmosféricos de California.

Los vehículos se adaptan bien al uso urbano porque la cantidad de combustible que puede llevarse a bordo es limitada. El hidrógeno puro en forma gaseosa ocupa 12,9 veces más espacio que la gasolina necesaria para recorrer una distancia equivalente y 3,8 veces el espacio del gas natural. Se puede almacenar suficiente hitano para cubrir 325 kilómetros en un depósito de tamaño 3,4 veces mayor que el del depósito de gasolina equivalente, a condición de comprimirlo hasta 200 atmósferas.



POR QUE LAS COMPAÑIAS ALTERAN LOS PRECIOS	Importancia media (en escala 1 a 4)
Alterar el nivel de servicios, no el precio	2,86
Esperar que otras empresas los suban	2,85
Esperar que los costos suban	2,72
Vacilación en romper el pacto tácito con el cliente	2,52
Mantener contactos con los clientes	2,29
Incurrir en gastos cuando se alteran los precios	2,28
Creer que con la caída de la demanda basta	1,97
Evitar exceder ciertos niveles de precios: 999 pesetas	1,97
Optar por rebajar el almacenamiento	1,72
Mantener constantes los costos marginales	1,56
Sentirse postergado por la burocracia	1,54
Preocupación de que se crea que la calidad es inferior	1,45

FUENTE: *Alan S. Blinder*

Economía con rostro humano

Los macroeconomistas solían dejar fuera de sus ecuaciones un importante factor: el comportamiento humano en el mundo real. No era algo anómalo, si tenemos en cuenta que, después de todo, las cuestiones macroecónomicas dependen de las variaciones de la economía entendida en su globalidad: fluctuaciones del producto nacional bruto o de la inflación. Pero queramos o no esos mismos problemas terminan por reducirse al comportamiento de los consumidores y productores. Nadie se atrevía, a pesar de todo, a preguntarle a la gente cuáles eran sus decisiones económicas.

Nadie, salvo Alan S. Blinder, profesor de la Universidad de Princeton, que ha comenzado a preguntar a los directivos empresariales responsables de los precios de los productos por qué suben o bajan y cuándo lo hacen. Otra excepción, W. Brian Arthur, economista de la Universidad de Stanford, está empeñado en enseñar a autómatas a comportarse como las personas, para dejarlos después actuar en otros problemas.

"Los economistas, más que otros especialistas en ciencias sociales, son profundamente escépticos ante la posibilidad de aprender preguntando a la gente", dice Blinder. El escepticismo tiene su base. La gente puede recelar y no decir la verdad. O, como los jugadores de water polo a los que se pide que describan la física de un lanzamiento a puerta, no sepan explicar la mecánica de su comportamiento. Por último, las muestras pequeñas no resultan de fiar.

La teoría y la econometría poseen también sus limitaciones; limitaciones que muchas veces son más serias de lo que se está dispuesto a admitir. Un ejemplo que hace al caso es el asunto de los precios y salarios "pegajosos", fenómeno descubierto por John Maynard Keynes en los años treinta. Keynes observó que la teoría en boga —es decir, que los precios y salarios subían y bajaban de acuerdo con la marea de la oferta y la demanda— no acababa de encajar. Antes bien, salarios y precios se movían pesadamente.

No faltan explicaciones para semejante viscosidad de precios y salarios; mas tampoco hay forma de asegurar cuál de ellas da en el clavo. (Ninguna predice con exactitud la lentitud con que acontecerán los cambios.) Así las cosas, Blinder y un grupo de alumnos de doctorado comenzaron a preguntar a quienes toman las decisiones en las empresas sobre sus estrategias de precios. De eso hace ya casi tres años.

Los resultados provisionales, basados sobre 72 de las 200 entrevistas previstas, son tan raros cuan interesantes. Los directivos alteran los precios sólo una vez al año; y, pese a lo que pueda parecer, les cuesta tanto subirlos como bajarlos.

De una docena de explicaciones económicas a propósito de esa viscosidad mencionada, sólo cuatro se consideraron dominantes por más de la mitad de los entrevistados. Los directivos confesaban que preferían, más que subir o bajar los precios, recurrir a otras tácticas: alargar (o acortar) el tiempo que se tarda en servir las mercancías y recortar (o añadir) servicios adicionales al consumidor. También rechazaron dos teorías que han gozado de predicamento; a muy pocos les preocupaba que el cliente interpretase los recortes en los precios como una disminución de la calidad.

Está por ver si la exploración de Blinder convencerá a los macroeconomistas para que hablen más con la gente. Robert J. Shiller, de la Universidad de Yale, otro macroeconomista que ha buscado así los datos, ha hallado una acogida tibia en su trabajo. El año pasado, él y dos economistas soviéticos preguntaron a la gente, en Nueva York y Moscú, si les parecía que las empresas eran justas al fijar sus precios. Sorprendentemente, las actitudes no solían discrepar. Más inesperados fueron los comentarios de uno de los censores cuando Shiller envió su trabajo a cierta revista académica. "Esto no es economía", "Esto carece de interés en economía", recuerda Shiller que se le apostilló. El trabajo de Blinder, dice Shiller, "rectificará el daño hecho por Milton Friedman", cuyo ensayo *La metodología de la economía positiva* ha sido adoptado por los economistas como un caso de análisis altamente matemático.

Empleando técnicas de programación desarrolladas por John H. Holland, experto en ordenadores de la Universidad de Michigan en Ann Arbor, los autómatas de Arthur pueden igualar las selecciones realizadas por un grupo de estudiantes en una serie de experimentos llevados a cabo en la Universidad de Harvard en los años cincuenta. Plantea luego ciertos problemas a los autómatas y observa la decisión que toman.

Hasta ahora, los sujetos informáticos han abordado sólo sencillos problemas, como elegir entre alternativas con diferentes beneficios. Con el tiempo, Arthur espera usar sus agentes para comprobar si ciertas hipótesis económicas —como la idea de que los mercados siempre convergen hacia un equilibrio— muestran ser verdaderas.

Microscopios de rayos X

Los trabajos en microscopía de rayos X blandos han culminado con la construcción de instrumentos cuya resolución decuplica la del microscopio óptico. Con ellos se abre ya un camino para realizar análisis químicos

Malcom R. Howells, Janos Kirz y David Sayre

Cada adelanto en las técnicas microscópicas ha proporcionado a los científicos nuevas perspectivas sobre el funcionamiento de los organismos vivos y la naturaleza de la propia materia. La invención del microscopio de luz visible a finales del siglo XVI mostró un reino antes desconocido de plantas y animales unicelulares. El desarrollo de la cristalografía de rayos X a principios del siglo XX ofreció las primeras imágenes precisas de la materia con "resolución atómica". Durante las décadas siguientes, los microscopios electrónicos han proporcionado imágenes directas de virus y minúsculas estructuras superficiales. Ahora, otro tipo de microscopio que utiliza rayos X en vez de luz visible o electrones aporta un modo diferente de examinar los detalles diminutos; esto debería aumentar aún más nuestra capacidad de percepción del mundo natural.

Los nuevos microscopios de rayos X tienen una resolución bastante mejor que la de los microscopios ópticos. Sirven, además, para trazar mapas de la distribución de ciertos elementos químicos. Algunos pueden formar imágenes en tiempos brevísimos, y los hay incluso que prometen capacidades tan especiales como la de obtener imágenes tridimensionales. A diferencia del microscopio electrónico convencional, el microscopio de rayos X permite mantener los especímenes al aire y en agua, lo que significa que las muestras biológicas pueden ser estudiadas bajo condiciones similares a las de su estado natural. La iluminación usada, rayos X "blandos" en el rango de longitud de onda de 20 a 40 angstroms (un angstrom es la diezmilmillonésima parte de un metro), es, además, lo suficientemente penetrante como para producir en muchos casos imágenes de células biológicas sin alterar. Debido a la longitud de onda de los rayos X empleados, los microscopios de rayos X blandos nunca alcanzarán una resolución más alta que la posible con microscopios de electrones. Pero sus propiedades especiales harán viables investigaciones que complementen las realizadas con instrumentos basados en la luz visible y en los electrones.

El sueño de construir un microscopio de rayos X data de 1895, cuando Wilhelm Röntgen, de la Universidad de Würzburg, descubrió los rayos X. La capacidad de los rayos X para penetrar en objetos sólidos aportó un motivo de peso para utilizarlos en microscopía. Sin embargo, los científicos descubrieron rápidamente que no se podía refractar o reflejar rayos X del mismo modo que se hacía con la luz visible. Las primeras imágenes se realizaron, por contra, mediante la proyección de rayos X a través de un espécimen puesto en contacto con una película fotográfica ordinaria. Los rayos X que atravesaban el espécimen impresionaban la película; la imagen resultante podía examinarse con un microscopio óptico. Esta forma de microscopía de rayos X, conocida como microrradiografía de contacto, se sigue empleando todavía hoy en día.

A principios del siglo XX se conocía la naturaleza de los rayos X: ondas electromagnéticas que tan sólo diferían de la luz visible en que tenían una longitud de onda mucho más corta. Este descubrimiento implicaba que la microscopía de rayos X ofrecía un posible camino hacia la alta resolución. La longitud de onda de la luz visible limita la máxima resolución del microscopio óptico a unos 2500 angstroms. Los microscopios ópticos construidos hace 100 años ya se aproximaban mucho a ese límite. Los biólogos se dieron cuenta de que, para comprender la organización y función de las células, se necesitaba una mejor resolución y pensaron que los rayos X, con una longitud de onda más corta, podrían servirles.

Por desgracia, el gran tamaño de grano de las películas fotográficas ponía un freno a la microrradiografía de contacto. El microscopio óptico utilizado para examinar la película impresionada limitaba aún más esta técnica. Por culpa de estas limitaciones la primitiva microscopía de rayos X no pudo igualar, ni mucho menos superar, la resolución de la microscopía óptica ya existente. Se necesitaba un sistema que pudiera producir una imagen de rayos X focalizada. El desarrollo de tal sistema resultó ser una tarea difícil, que sólo se está consiguiendo actualmente.

En 1923, Arthur H. Compton mostró que los rayos X podían ser eficientemente reflejados por superficies muy bien pulidas, si los rayos incidían sobre ellas con un ángulo rasante pequeño. Con una superficie de forma apropiada, los rayos X podían focalizarse y, así, producir imágenes ampliadas similares a las obtenidas mediante sistemas ópticos convencionales. A finales de los años cuarenta, Paul H. Kirkpatrick y su grupo de la Universidad de Stanford decidieron construir un microscopio de rayos X

MALCOLM R. HOWELLS, JANOS KIRZ y DAVID SAYRE han colaborado en varios proyectos de microscopía de rayos X con el Laboratorio Nacional de Brookhaven. Howells, que recibió su doctorado en física en la Universidad de Londres, es ahora científico de plantilla en el Laboratorio Lawrence de Berkeley. Kirz, que defendió su tesis en física en Berkeley, enseña en la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook. Sayre realizó su doctorado en cristalografía química en Oxford y pasó muchos años en IBM. Está retirado pero continúa trabajando como investigador invitado en el recinto de Stony Brook de la universidad neoyorquina y en Brookhaven.

de alta resolución basado en este principio, pero su esfuerzo por obtener una resolución mejor que la del microscopio óptico fracasó. Las aberraciones y las pequeñas tolerancias en la manufactura de las superficies que este diseño requería planteaban serias limitaciones.

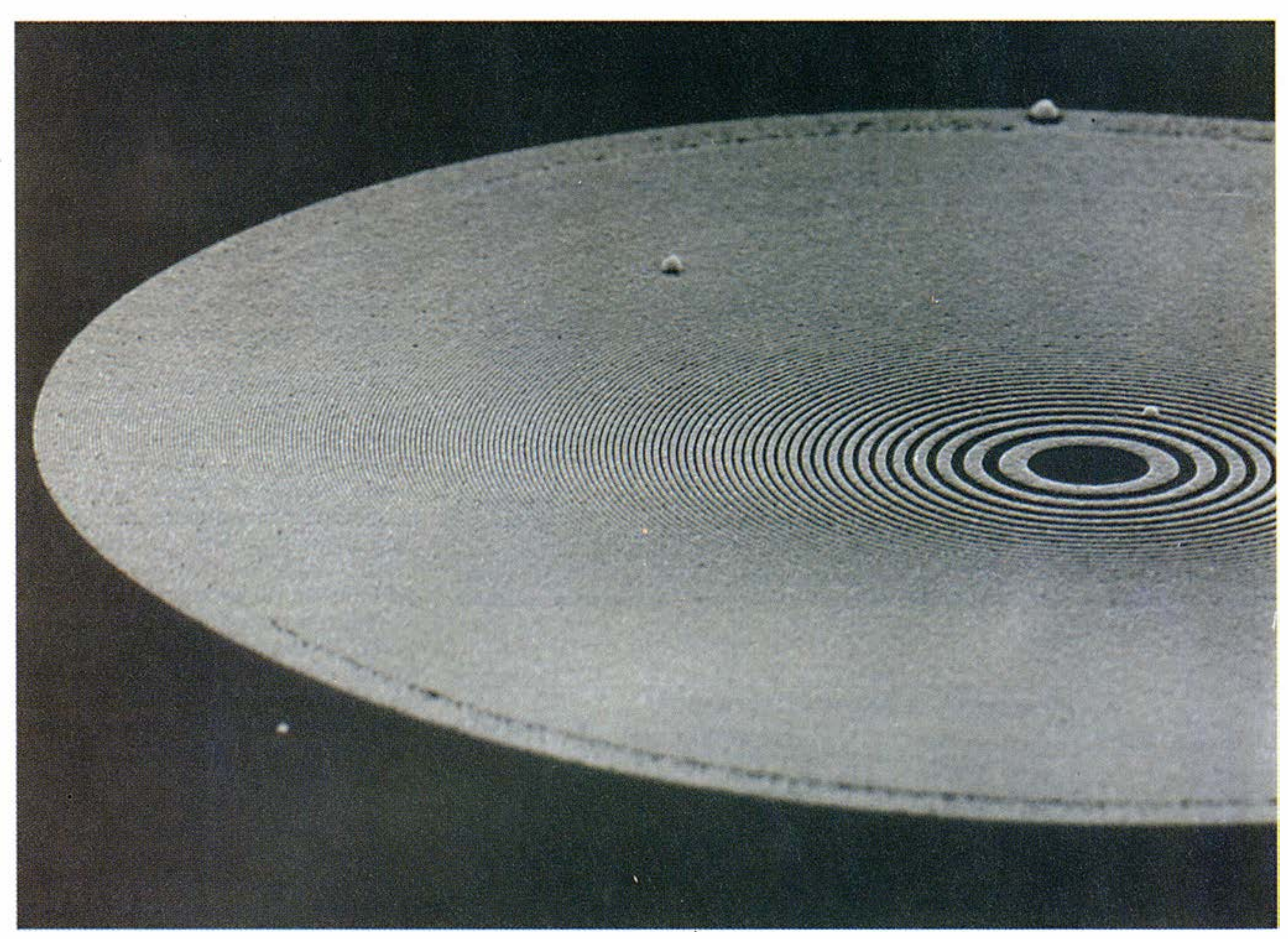
Mientras que las prestaciones de los microscopios de rayos X no mejoraban, un competidor —el microscopio electrónico— efectuaba rápidos progresos. Así, durante los años cuarenta, los microscopios electrónicos alcanzaban rutinariamente una resolución mejor que la obtenida con microscopios de luz visible. La comunidad de biólogos, por su parte, empezó a desarrollar las técnicas de preparación de especímenes necesarias para aprovechar las capacidades del microscopio electrónico. Desde entonces, la microscopía electrónica se ha convertido en una herramienta habitual para toda una generación de biólogos, impulsando avances extraordinarios en la comprensión de la función y estructura celulares. El éxito de la microscopía electrónica llevó a una interrupción temporal en el desarrollo del microscopio de rayos X.

En los últimos 20 años, el interés por la microscopía de rayos X ha resurgido gracias, en gran parte, a varios avances técnicos importantes. El más significativo de ellos ha sido el desarrollo de nuevas fuentes de rayos X. Para lograr imágenes de alta resolución, algunos tipos de microscopios de rayos X necesitan fuentes de un brillo sin precedentes. La última década ha sido testigo de rápidos progresos en el brillo de las fuentes de rayos X basadas en la radiación de sincrotrón (radiación emitida por partículas cargadas al ser aceleradas por un campo magnético).

Como resultado de lo anterior, el brillo disponible hoy en día es millones de veces mayor que el obtenido mediante los tubos de rayos X que fueron las únicas fuentes de rayos X blandos disponibles durante la mayor parte de este siglo. También se ha producido un gran progreso en el desarrollo de láseres de rayos X y de plasmas emisores de rayos X, que son capaces de producir pulsos de rayos X de intensidad suficiente como para formar una imagen en un nanosegundo (una milmillonésima de segundo) o menos.

Los detectores de rayos X también han experimentado drásticas mejoras. Se han introducido detectores electrónicos y resinas fotosensibles (materiales formados por una fina capa de plástico cuya resistencia a ataques químicos cambia cuando se expone a la acción de haces de electrones o rayos X), que han reemplazado a la película fotográfica en muchas aplicaciones. Las resinas han demostrado ser detectores de rayos X baratos, idóneos y con resolución casi 100 veces mejor que la de la película fotográfica.

Merece reseñarse otro avance importante: los investigadores han conseguido finalmente focalizar rayos X con precisión superior a la óptica mediante el uso de "placas zonales de Fresnel". Estos dispositivos son redes



1. PLACA ZONAL DE FRESNEL formada por anillos concéntricos de oro sobre una membrana de nitruro de silicio de tan sólo 1200 angstroms de espesor. Los rayos X que atraviesan las zonas interanulares son difractados y focalizados. Gracias a ello, se pueden construir lentes para rayos X análogas a las utilizadas en microscopios de luz visible. La anchura del menor espaciado entre anillos (que es aproximadamente igual a la resolución máxima alcanzable por el microscopio empleando la placa) es de unos 300 angstroms. Esta placa zonal fue fabricada por Erik Anderson.

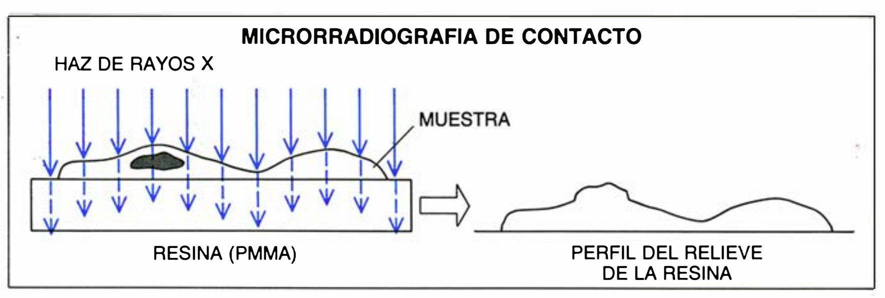
de difracción circulares formadas por anillos concéntricos, transparentes alternados con opacos, cuyo espaciado disminuye al aumentar la distancia desde el centro. Las ondas se difractan cuando atraviesan los anillos transparentes. De este modo, cada parte del rayo incidente sufre una deflexión apropiada para que las ondas converjan hacia un punto focal común. Las lentes de placas zonales se han utilizado para focalizar luz, ondas de radio, sonido e incluso neutrones. En 1960, Albert V. Baez, entonces en el Observatorio Astrofísico Smithsoniano de Harvard, propuso que tales placas podrían focalizar también rayos X.

La fabricación de placas zonales de alta resolución es un problema técnico complejo. La mejor resolución posible para una placa dada viene a ser igual al tamaño más fino de su espaciado zonal. Para conseguir una resolución mejor que la del microscopio óptico se necesita, por tanto, crear zonas cuyos espaciados sean mucho menores que la longitud de onda de la luz. Las técnicas de fabricación óptica convencionales no están, naturalmente, a la altura de este cometido. Sin embargo, los investigadores han construido recientemente placas zonales con espaciados de sólo 300 angstroms, en torno a la vigésima parte de la longitud de onda de la luz visible, aplicando métodos desarrollados para la manufactura de microcircuitos.

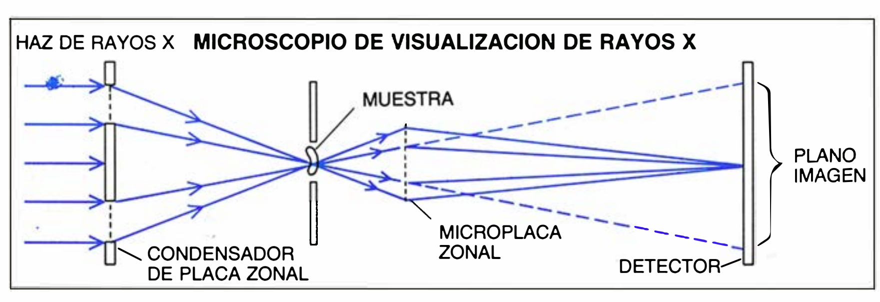
Un método para abordar este problema, iniciado por Gunter Schmahl y Dietbert Rudolph, de la Universidad de Göttingen, consiste en la utilización de técnicas holográficas de ultravioleta (generalización de las técnicas usadas en la creación de hologramas de luz visible) para imprimir un diagrama de placas zonales en una película de resina fotosensible. El método holográfico ha tenido un éxito impresionante, pero está limitado por la difracción de la luz ultravioleta a anchuras de la zona externa de unos 500 angstroms.

Otra técnica, más precisa, consiste en utilizar haces de electrones para "dibujar" el diagrama de placas zonales en la resina. Los métodos de microfabricación posibilitan la transferencia de estos diagramas a estructuras de oro, níquel o germanio. La técnica del haz de electrones fue utilizada en 1974 en el laboratorio de Dieter Kern en el Centro de Investigación Thomas J. Watson de IBM, donde todavía se siguen fabricando las mejores placas zonales disponibles (hoy las prepara Erik Anderson, del Centro para Optica de rayos X del Laboratorio berkeleyano Lawrence, bajo la dirección de David Attwood). Todas las microfotografías de barrido de rayos X mostradas en este artículo se tomaron usando placas zonales producidas por este equipo. Pambos Charalambous, que trabaja en el grupo de Ronald Burge del King's College londinense, también ha realizado placas zonales de precisión mediante una técnica afín. Las placas zonales de más alta resolución fabricadas hasta ahora tienen anchos de zona externa entre 200 y 300 angstroms.

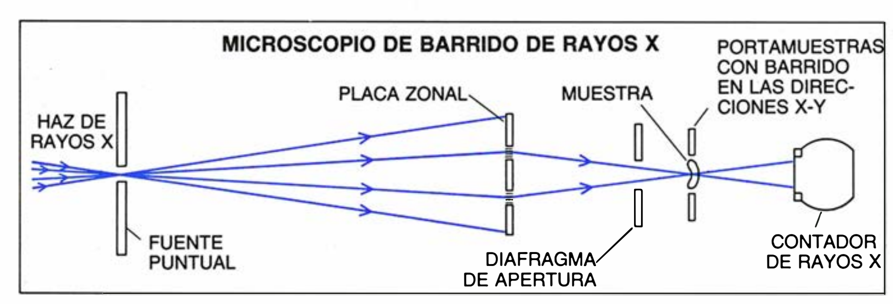
Las placas zonales para rayos X son bastante pequeñas, alrededor de



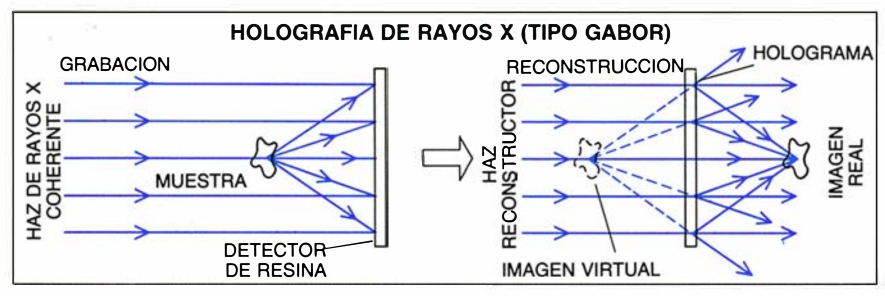
2. DIAGRAMA DE DAÑOS producido en la resina como resultado del paso de los rayos X a través de la muestra (*izquierda*). Un revelador ataca las regiones dañadas por la radiación (*derecha*).



3. LAS PLACAS ZONALES DE FRESNEL sirven como objetivo y lente condensadora de rayos X. La primera placa focaliza el haz sobre la muestra; la segunda amplía la imagen sobre un detector.



4. HAZ DE RAYOS X FOCALIZADO, que barre toda la muestra, de lado a lado y de arriba abajo; los rayos que inciden en cada punto se miden en un detector de rayos X de cómputo proporcional.



5. INTERFERENCIA entre los haces de rayos X incidentes y dispersados. La interferencia graba un holograma en una lámina de resina (*izquierda*). La imagen se reconstruye (*derecha*) iluminando el holograma con luz de láser digitalizando el holograma y tratándolo matemáticamente.

IMAGENES CON RESOLUCION SUPERIOR A LA DEL MICROSCOPIO OPTICO, OBTENIDAS CON TRES TECNICAS DE MICROSCOPIA DE RAYOS X DIFERENTES

MICROSCOPIO DE BARRIDO



MICROSCOPIO DE VISUALIZACION



MICRORRADIOGRAFIA DE CONTACTO



6. IMAGEN DE UNA CELULA DE TEJIDO CONJUNTIVO de un embrión de pollo (*izquierda*) obtenida por John Gilbert, Jerome Pine y Christopher Buckley con el microscopio de barrido de rayos X en el Laboratorio Nacional de Brookhaven. En la imagen se aprecian dos núcleos, cada uno con dos nucléolos, así como numerosos gránulos demasiado pequeños para observarse bajo el microscopio óptico. La imagen está tomada manteniendo la célula en ambiente húmedo y sin recurrir al proceso de tinción. Usando el microscopio de visualización de rayos X de Göttingen en el anillo de almacenamiento de BESSY en Berlín, el profesor Peter Guttman y sus colaboradores obtuvieron una imagen de la estructura filamentosa de un cromosoma perteneciente a una larva de mosquito también en ambiente húmedo y sin tinción previa (*centro*). P. C. Cheng y O. C. Wells mediante microscopía de contacto (*derecha*) obtuvieron la imagen de una célula seca de tejido conjuntivo humano, en la que se muestran fibras de sostén fuera del núcleo de la célula. La imagen muestra la superficie de la resina sensible a los rayos X ampliada por un microscopio electrónico.

0,1 milímetros de diámetro, y de pequeño espesor, para que trabajen mejor con rayos X de longitudes de onda mayores que unos cinco angstroms.

Los avances técnicos de los últimos años han permitido que los microscopios de rayos X alcancen resoluciones que van más allá del límite del microscopio óptico. Hasta ahora cuatro métodos de rayos X han logrado esta proeza: la microscopía de contacto, la microscopía de visualización, la microscopía de barrido y la holografía. Cada una tiene sus peculiares ventajas.

La microscopía de contacto es la técnica más socorrida. La microscopía de contacto moderna difiere de la primitiva microrradiografía en dos aspectos importantes. En primer lugar, las resinas fotosensibles empleadas como detectores (generalmente PMMA, la materia prima del plexiglás) permiten una resolución superior a la de las películas fotográficas que se utilizaban en un comienzo. En segundo lugar, la imagen grabada en el material detector es visualizada por instrumentos de más alta resolución, principalmente el microscopio electrónico. Ambos avances surgen de un artículo publicado en 1956 por William A. Ladd y sus colaboradores, de la Columbian Carbon Company de Nueva York.

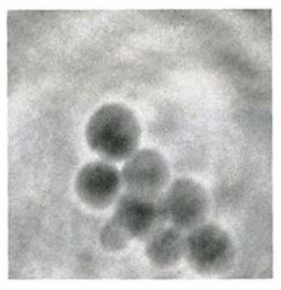
Los pioneros de la microscopía que utiliza detectores de resinas fueron Ralph Feder y Eberhard Spiller, de IBM. Aunque el método de contacto posee muchas ventajas, incluidas una relativa simplicidad y comodidad, la resolución de las imágenes de contacto está limitada por la fidelidad de los procedimientos de lectura disponibles y por la falta de nitidez de la imagen debido a fenómenos de difracción, auténtico problema a la hora de estudiar especímenes gruesos.

El microscopio de visualización de rayos X utiliza óptica de focalización para formar una imagen ampliada en unos pocos cientos de veces, que puede ser grabada a continuación por un detector de resolución modesta. Los dispositivos de más alta resolución emplean lentes de placas zonales de Fresnel como elemento focalizador. El dispositivo de grabación puede ser una película fotográfica sensible a los rayos X o un detector electrónico. El grupo de Schmahl en Göttingen ha construido un microscopio de este tipo que alcanza resoluciones de 550 angstroms, utilizando el tipo de placas zonales creadas holográficamente a las que nos hemos referido antes. Otros microscopios de visualización se están construyendo en Inglaterra y Japón.

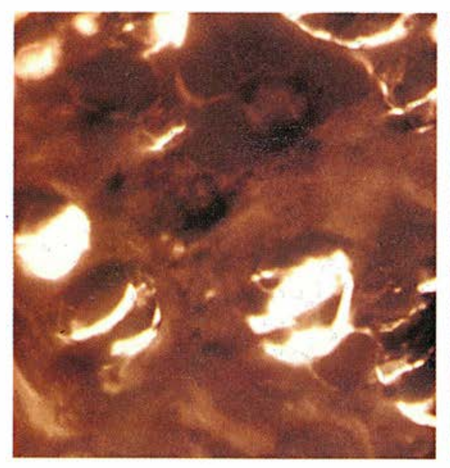
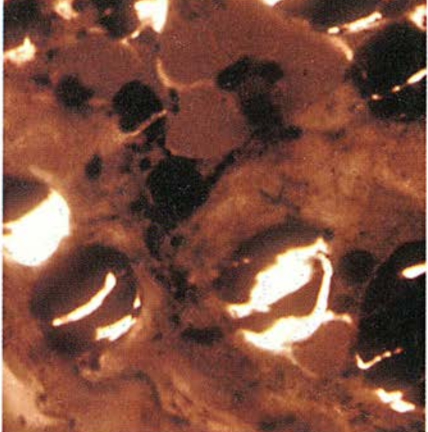
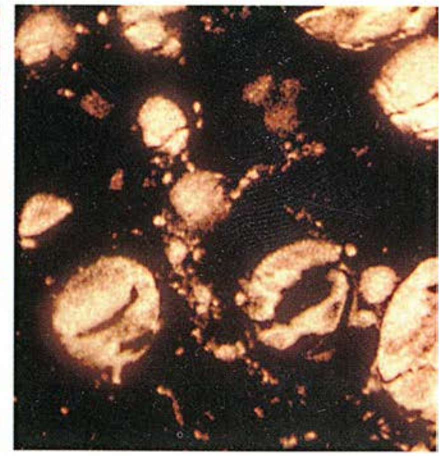
Los microscopios de visualización de rayos X ofrecen múltiples ventajas; la principal: toda la muestra es iluminada y visualizada al mismo tiempo. Esto permite tomar la imagen rápidamente, lo que ayuda a eliminar la falta de nitidez de las imágenes que provenga del movimiento y minimiza el daño que la radiación pueda infligir a las muestras biológicas. Se evita, además, la necesidad de fuentes de rayos X avanzadas con un







7. HOLOGRAMA DE RAYOS X (*izquierda*), que proporciona la información para generar las dos imágenes reconstruidas de un agrupamiento de vacuolas secas de almacenamiento de enzimas. Una de ellas muestra la imagen con contraste de intensidad (*centro*) y la otra con contraste de fase (*derecha*). El holograma fue realizado por Chris Jacobsen, Howells y Rothman, en Brookhaven.

8. TENDON HUMANO ENFERMO estudiado por Buckley y Yusuf Ali con el microscopio de barrido de rayos X de Brookhaven. Las imágenes de secciones del tendón sin teñir fueron tomadas con rayos X de energía justo por debajo (*izquierda*) y por encima (*centro*) de 350 eV, valor al cual el calcio aumenta bruscamente su absorción de rayos X. Restando la primera imagen de la segunda, obtenemos la imagen diferencia (*derecha*).

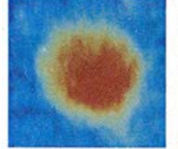
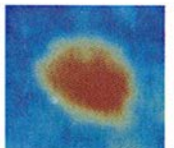
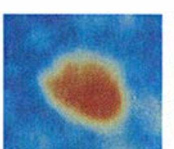
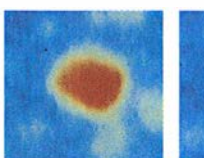
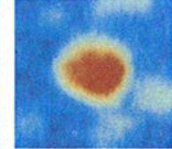
gran grado de coherencia, u organización de fase. Estos microscopios, sin partes móviles, deberían ser muy fiables y susceptibles de comercialización. De hecho, un consorcio de las universidades de Göttingen y Aquisgrán, junto con la compañía de óptica Carl Zeiss, está desarrollando un instrumento de este tipo [*véase la figura 11*].

Recientemente, el grupo de Göttingen mostró cómo obtener una imagen cuyo nivel de gris fuera proporcional al cambio de fase de los rayos X producido por la transmisión a través del espécimen. Este microscopio de "contraste de fase" permitirá, tarde o temprano, una mayor flexibilidad en la longitud de onda, dosis menores de rayos X y una mayor resolución, quizá.

Durante años, los microscopios de visualización y de contacto llevaron ventaja sobre otros diseños en términos del número de microfotografías de rayos X producidas. Pero la situación está cambiando merced a la aparición en escena de varios nuevos microscopios de rayos X de barrido. En los microscopios de barrido, se forma la imagen elemento (píxel) a elemento, igual que si se tratara de la imagen de una pantalla de televisión. El proceso comienza con el uso de una placa zonal que focaliza el haz de rayos X en un punto iluminado de la muestra. Algunos rayos atraviesan la muestra; la fracción del haz incidente que pasa a través de él determina el tono de gris asignado a este píxel. El punto focalizado barre la muestra en líneas de lado a lado y de arriba abajo, grabando sucesivos píxeles. El tamaño del haz determina la resolución.

Aunque parezca lento y laborioso, el método de barrido tiene claras ventajas. La técnica se presta fácilmente a la grabación de imágenes basada en ordenadores y al análisis químico punto a punto. Por otra parte, permite mantener la muestra en aire, mientras que casi todo el recorrido del haz de rayos X se encuentra en vacío. Además, el barrido minimiza el tiempo de exposición del espécimen a la radiación dañina. Sin embargo, este método, cuando se lleva a cabo con una placa zonal de Fresnel, requiere un haz de rayos X blandos coherente, que sólo puede ser suministrado por una gran instalación de radiación de sincrotrón.

El primer microscopio de barrido de rayos X que alcanzó resolución superior a la del óptico fue construido en 1982 por uno de nosotros (Kirz), Harvey Raback y John Kenney, de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook. Está emplazado en la Fuente Nacional de Radiación de Sincrotrón (NSLS), en el Laboratorio Nacional de Brookhaven. Se acaba de reconstruir para mejorar su resolución e incrementar su velocidad en la toma de imágenes, lo que permitirá aprovechar las características de una nueva fuente de rayos X, llamada ondulador. Este dispositivo obliga a seguir a los electrones, mediante campos magnéticos, una trayectoria suavemente ondulada, lo que provoca la emisión de un haz estrecho de gran brillo. Con tal haz, el microscopio produce imágenes en un tiempo aproximado de un minuto. En su reforma intervino un amplio grupo de investigadores; entre otros: Christopher Buckley, Mark Rivers y Deming Shu, así como físicos de Stony Brook, del NSLS y del Centro para óptica de rayos X. Un microscopio similar construido por el King's College opera en el laboratorio Daresbury en Cheshire y varios más se encuentran en fase de realización.

9. VACUOLA DE ALMACENAMIENTO DE ENZIMAS de una célula pancreática. La secuencia de imágenes muestra cambios de tamaño y densidad a medida que la vacuola va descargando su contenido proteínico. Esta secuencia, producida por Kaaren Goncz y Stephen S. Rothman con el microscopio de barrido de rayos X de Brookhaven, da una medida cuantitativa de dichos cambios.

Entre sus metas fundamentales, la microscopía de rayos X se propuso la de examinar material biológico en condiciones próximas a las de su estado natural. Esto requiere que las muestras estén intactas y, por tanto, que posean cierto grosor. En el estudio de tales objetos es apropiada la utilización de rayos X blandos, puesto que tienen aproximadamente el poder de penetración adecuado. Persiste el interés en lograr utilizar holografía mediante rayos X, una técnica relacionada con el método empleado en la fabricación de placas zonales, para visualizar tales muestras en tres dimensiones.

La holografía tridimensional con rayos X requiere una resolución mejor que la actualmente posible. Pero

los microscopistas han conseguido ya imágenes holográficas bidimensionales detalladas. La holografía presenta la característica adicional, como ocurre en la microscopía de contacto, de no precisar mecanismo de enfoque.

La visualización holográfica fue propuesta en 1948 por Dennis Gabor, de la Compañia Británica Thomson Houston. Se fundamenta en el hecho de que la radiación electromagnética, ya sea en el rango visible o en otros, es un fenómeno ondulatorio sujeto a interferencia, de manera parecida a la producida en las ondas en el agua. Cuando dos ondas interfieren, las crestas de las ondas coinciden en ciertos lugares (reforzándose entre sí), mientras que en otros lugares una cresta coincide con un valle (cancelándose entre sí). El resultado neto es un diagrama de máximos y mínimos formado cuando la onda difundida por la muestra se combina con el haz original que iluminó a ésta. Gabor llamó holograma a la grabación de este diagrama. Un holograma almacena información sobre la amplitud y la fase de la onda difundida, proporcionando datos suficientes para reconstruir una imagen de la muestra con características tridimensionales.

Baez propuso en 1952 un esquema de microscopio holográfico de rayos X carente de lentes. El diseño era conceptualmente sencillo, pero su realización técnica era muy compleja. Ni la intensidad de las fuentes coherentes de rayos X ni la resolución de las emulsiones fotográficas disponibles estaban a la altura del proyecto. Esas limitaciones tecnológicas han sido recientemente superadas. En los dos últimos años, Dennis Joyeux en Francia, Sadao Aoki en Japón, James Trebes y Ian McNulty en EE.UU., junto a sus respectivos colaboradores, han producido hologramas de alta resolución mediante rayos X.

En 1987, Chris Jacobsen, trabajando con Kirz y Stephen S. Rothman del Laboratorio Lawrence de la Universidad de California en Berkeley y con uno de nosotros (Howells), mostró el primer microscopio holográfico con resolución superior a la del microscopio óptico. Usaron un ondulador, como fuente de rayos X, y detectores de alta resolución, que inicialmente producían hologramas tras una hora de exposición proporcionando una resolución promedio en la imagen mejor que 1000 angstroms.

Se ha reducido el tiempo de exposición a un minuto y se ha mejorado la resolución hasta los 600 angstroms. Esta resolución es todavía insuficiente para hacer imágenes tridimensionales. Si, como esperamos, la resolución de los experimentos actuales se aproxima a la resolución intrínseca de la resina, unos 100 angstroms para PMMA, las imágenes tridimensionales serán un hecho.

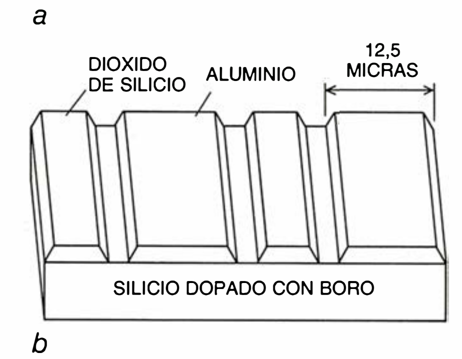
Ahora que los microscopios de rayos X son una realidad, la atención se dirige a sus más fructíferas aplicaciones. Se han utilizado microscopios de rayos X para examinar una amplia variedad de muestras, desde lombrices de tierra contaminadas con metales pesados hasta células humanas cancerosas, desde pelos de la epidermis a carbón, dispositivos semiconductores o cemento. Gran parte de las investigaciones actuales se centran en estudiar la capacidad de los microscopios y su aplicabilidad al estudio de diferentes clases de muestras. Ante la corta historia de los microscopios de rayos X de alta resolución, conviene mostrarse cauteloso a la hora de juzgar qué aplicaciones pueden o no beneficarse de su uso.

Los resultados obtenidos con los actuales dispositivos de rayos X han confirmado, como se esperaba, que las imágenes de rayos X y las microfotografías electrónicas de la misma muestra no se parecen. Los microscopios de rayos X son sensibles a la concentración de ciertos elementos, a menudo carbono y nitrógeno, mientras que los electrónicos suelen recoger la distribución de grupos químicos en la muestra que se han enlazado con la tintura productora del contraste. Ninguna de las dos imágenes es errónea. Sólo ofrecen diferentes aspectos de la estructura de la muestra.

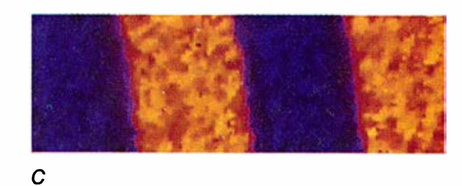
En general, los microscopios de rayos X y los electrónicos tienen ventajas complementarias. Los segundos hace mucho tiempo que superaron la resolución de los microscopios ópticos y, para muchas muestras, pueden ahora proporcionar resoluciones de entre 2 y 20 angstroms. Por otra parte, la resolución de los microscopios de rayos X usuales es del orden de unos pocos cientos de angstroms, y el límite fundamental impuesto por la difracción (semilongitud de onda) restringe la posibilidad de futuras mejoras. Los microscopios considerados en este artículo, que usan rayos X blandos, nunca alcanzarán resoluciones por encima de los 10-20 angstroms.

La principal contribución de los microscopios de rayos X no será la de romper barreras en cuanto a resolución, sino la de realizar medidas cuantitativas de objetos biológicos bajo pequeñas o nulas modificaciones, en condiciones muy próximas a las de su estado natural. Tales muestras no se pueden estudiar mediante microscopía electrónica convencional sin producir alteraciones físicas o químicas considerables. En algunos casos, la preparación y la irradiación con rayos X para tomar la imagen parece ser lo suficientemente inocua como para que la muestra pueda responder a la aplicación de ciertos estímulos. En estos casos se puede tomar una secuencia de imágenes que permita estudiar las respuestas o distinguirlas de los efectos producidos por la iluminación mediante el haz de rayos X.

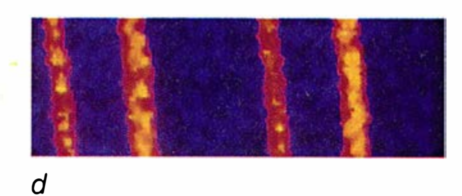
a



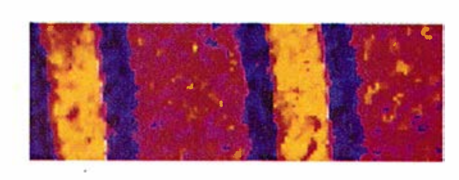
b



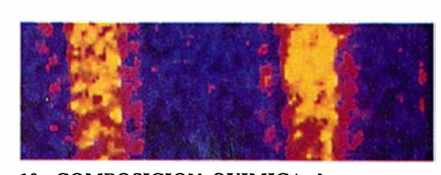
c



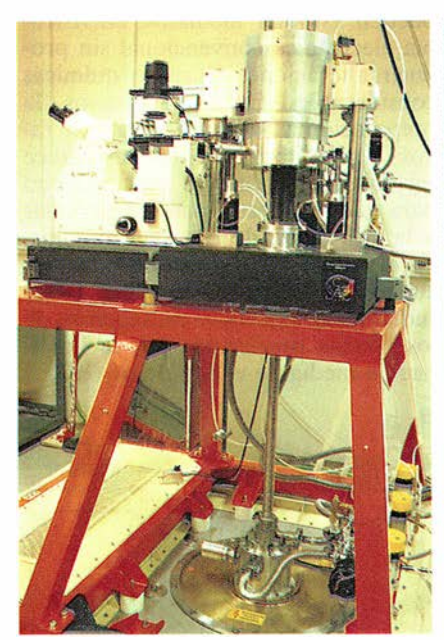
d

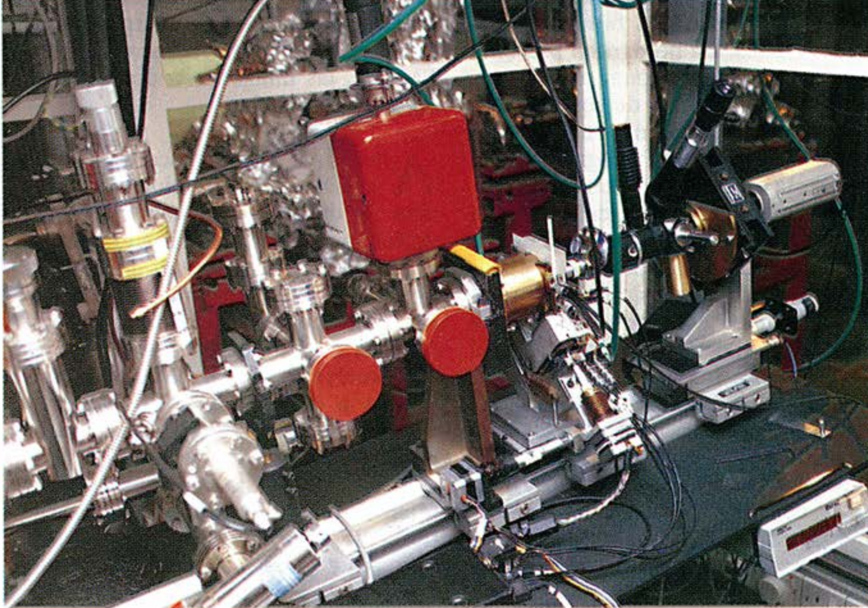


e



10. COMPOSICION QUIMICA de una muestra microfabricada (*a*) estudiada por Harald Ade y colaboradores usando un microscopio de barrido de fotoelectrones en el que los fotones de rayos X arrancan electrones provenientes de los átomos cercanos a la superficie de la muestra. Seleccionando energías de electrones característicos asociados con aluminio (*b*), silicio (*c*) y oxígeno (*d*), podemos identificar y situar espacialmente cada elemento. La imagen (*e*) permite apreciar que el silicio que se encuentra ligado al oxígeno formando dióxido de silicio presenta un desplazamiento en energía al compararlo con la energía correspondiente a la del silicio puro. Así podemos identificar dos estados químicos del Si.





11. MICROSCOPIO COMPACTO de visualización (*izquierda*) desarrollado en las universidades de Göttingen y Aquisgrán que incorpora una fuente de rayos X de plasma; tiene una resolución comprobada de 1000 a 2000 angstroms. Microscopio de rayos X de barrido utilizado por el King's College de Londres, se encuentra situado en la línea del ondulador de la fuente de radiación de sincrotrón de Daresbury en Cheshire (*foto de la derecha*).

Rasgo peculiar de los microscopios de rayos X es que pueden resaltar o suprimir la visibilidad de un elemento particular presente en la muestra. Cada elemento absorbe los rayos X de manera distinta. Para los rayos X de longitud de onda entre 23 y 44 angstroms, el oxígeno, y por añadidura el agua, es mucho más transparente que el material orgánico. Este hecho abre la posibilidad de distinguir estructuras a través del agua que forma alrededor de las 3/4 partes de la masa de las células. Esta zona del espectro de los rayos X se denomina ventana del agua; reviste interés en microscopía biológica.

La forma en que los rayos X interaccionan con la materia permite a los microscopios de rayos X realizar medidas cuantitativas de la densidad y composición química de una muestra. Para cada elemento existen ciertas energías críticas de los rayos X, los bordes de absorción; en éstas, los rayos X poseen exactamente la energía suficiente como para liberar un electrón. Sólo los rayos X que tengan al menos la energía crítica serán absorbidos con eficacia por cada elemento dado. Se puede aprovechar esta propiedad haciendo imágenes con energías justo por debajo y por encima mismo del borde de absorción. La diferencia entre ambas imágenes elimina la señal que proviene de todos los elementos, excepto la del que tenga su borde de absorción situado a esa energía particular. De esta forma los microscopios de rayos X pueden trazar mapas de la distribución espacial de un elemento químico sobre la muestra.

El problema del daño por radiación limita las aplicaciones tanto de la microscopía de rayos X como de la electrónica. Los cambios introducidos por la irradiación pueden ser importantes desde el punto de vista biológico, aun cuando sólo afectaran a una pequeña porción de moléculas de la célula. Por tanto, en imágenes con resolución superior a la óptica de células inicialmente vivas tomadas por medio de cualquier radiación ionizante, siempre pueden aparecer alteraciones significativas a nivel biológico.

Como microscopistas, nuestra visión del daño por radiación difiere de la de los biólogos. Nosotros queremos saber el grado de daño producido a la imagen para una resolución dada, con referencia a lo que esperábamos aprender. Por su parte, los biólogos están interesados primordialmente en el daño infligido sobre el organismo y sus diferentes sistemas (por ejemplo, el sistema reproductor). En cualquiera de los dos enfoques, entender la interacción entre la sonda radiativa y las muestras es un problema complejo. Los estudios experimentales del daño causado por rayos X blandos en función de los efectos producidos en imágenes microscópicas se encuentran en sus balbuceos.

Las imágenes de rayos X pueden alcanzar un mejor contraste (relación señal-ruido) con las técnicas de utilización del borde de absorción y, al contrario que las producidas con microscopios electrónicos, no están sujetas a distorsión por ciertos efectos de fondo, como la dispersión múltiple de electrones. La limpieza de la señal obtenida con métodos de rayos X permite que la tarea de tomar imágenes microscópicas se acometa sin producir tanto daño a la muestra como los métodos de visualización basados en electrones u otras partículas cargadas. La utilización de rayos X es compatible con técnicas de visualización rápida (flash), lo que proporciona otro modo de amortiguar los daños por radiación.

Estas ventajas, unidas a los modestos logros en la mejora de la resolución de los microscopios de rayos X con respecto a la microscopía electrónica, permiten que los rayos X sean utilizados para estudios de material biológico en su estado natural, sin proteger. En muchos casos los microscopios de rayos X pueden proporcionar imágenes que no están degradadas por el daño por radiación y que poseen una resolución que trasciende la que se puede obtener con el microscopio óptico.

¿Qué deparará el futuro para la microscopía de rayos X? Quizás el desarrollo fundamental que quepa esperar sea el de la mejora en prestaciones, especialmente en resolución. Los microscopios de rayos X aquí descritos pueden revelar detalles en el rango de 200 a 1000 angstroms. Todos ellos están limitados por las propie-

dades de las resinas involucradas, bien sea directamente en los procesos de formación de imágenes holográficas y de contacto, o indirectamente en la fabricación de las placas zonales usadas en otros microscopios. El límite de resolución intrínseca de los PMMA, aproximadamente 100 angstroms, está determinado fundamentalmente por su tamaño molecular; sobrepasar esa cota requerirá nuevos planteamientos.

La microscopía de rayos X de contraste de fase desarrollada recientemente promete ser una técnica poderosa que proporcione mejoras en el contraste y dosis de radiación más baja en la zona de más corta longitud de onda. Nuevas fuentes de radiación de sincrotrón tales como la Fuente Avanzada de Luz del Laboratorio Lawrence Berkeley, todavía en construcción, incrementarán la intensidad disponible, permitiendo la formación de imágenes con mucha mayor rapidez.

Una mejor resolución, superando los límites impuestos por los detectores PMMA, podría también estar disponible a corto plazo. Supongamos, por ejemplo, que el diagrama de difracción de rayos X se midiera sin el uso de una onda de referencia, como se hace en cristalografía de rayos X. En un experimento así, el patrón de intensidad de los haces difractados debería permitirle al investigador deducir la estructura del objeto que ha dispersado los rayos X. La calidad de la resolución que se puede obtener por este método está determinada por el rango de ángulos en que se puedan medir los haces difractados. En el caso extremo, la medida sobre toda la esfera permitiría una completa visualización tridimensional y una resolución del orden de la semilongitud de onda de los rayos X, que para las radiaciones aquí consideradas significaría una resolución de 10 a 20 angstroms.

En experimentos recientes iniciados por uno de los autores, Sayre, junto con Kirz, Wenbing Yun, del Laboratorio Nacional de Argonne, y Mark Sharnoff, de la Universidad de Delaware, se han tomado diagramas de difracción registrando señal hasta 15 grados fuera de eje con respecto al haz incidente; esto corresponde a una resolución en la imagen de 70 angstroms. Valor que habrá de mejorarse cuando se lleven a la realidad los planes para producir un haz de rayos X de mayor coherencia.

La microscopía de rayos X ha empezado a abrirse camino más allá de de las ciencias de la vida hacia la ciencia de superficies y el análisis de trazas químicas. En ciencia de superficies no se estudian los rayos X, sino los electrones arrancados por ellos de los átomos que están cerca de la superficie de la muestra. La técnica para medir la energía de los electrones liberados, denominada espectroscopía de fotoelectrones, ha entrado ya en un nivel de rutina. Combinando espectroscopía e imágenes de alta resolución de microscopía de rayos X, será posible identificar, y trazar, la distribución de los diferentes elementos así como determinar su estado de ligadura química cerca de la superficie de la muestra.

Estos adelantos abrirán áreas de investigación en superficies heterogéneas, como las de catalizadores y dispositivos semiconductores. Recientemente, Harald Ade, junto con Erik Johnson y Steven L. Hubert, del NSLS, y en colaboración con Anderson, Kern y Kirz, alcanzaron resolución por debajo de la micra. El y sus colegas del NSLS realizaron los análisis químicos antes citados con un microscopio de fotoelectrones basado en la utilización de lentes de placa zonal. Dispositivos similares se están desarrollando en Hamburgo, Stanford, Wisconsin y en otros lugares del mundo.

Tras casi un siglo de investigación, las técnicas de microfabricación han convertido el sueño de un microscopio de rayos X en realidad. Los estudios usando rayos X que son ahora posibles representan una oportunidad valiosa para ampliar el conocimiento humano sobre el mundo natural. Esperamos con optimismo que el progreso en este campo continúe y que las promesas basadas en el uso de estos instrumentos se satisfagan plenamente.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

X-RAY MICROSCOPY. Dirigido por G. Schmahl y D. Rudolph. Springer-Verlag, 1984.

X-RAY MICROSCOPY II. Dirigido por D. Sayre, M. Howells, J. Kirz y H. Rarback. Springer-Verlag, 1988.

X-RAY MICROSCOPY. A. G. Michette en *Reports on Progress in Physics*, vol. 51, n.º 12, págs. 1525-1606; diciembre de 1988.

MODERN MICROSCOPIES: TECHNIQUES AND APPLICATIONS. Dirigido por P. J. Duke y A. G. Michette. Plenum Press, 1990.

SOFT X-RAY IMAGING FOR THE LIFE SCIENCES. M. R. Howells en *Synchrotron Radiation and Biophysics*. Dirigido por S. S. Hasnain. Ellis Horwood, 1990.

X-RAY MICROSCOPY III. Dirigido por A. Michette, G. Morrison y C. Buckley. Springer-Verlag (en prensa).

El equidna

Este mamífero ovíparo, también llamado hormiguero espinoso, ha vivido en relativa oscuridad en el chaparral australiano. Pero empezamos ya a conocer los secretos que encierran su historia natural y su hábito reproductor

Peggy D. Rismiller y Roger S. Seymour

El equidna es el animal de origen australiano que conoce más amplia distribución y encierra, al mismo tiempo, mayor misterio. Raramente se le ve en el continente insular y, a diferencia de su pariente más cercano, el ornitorrinco, es casi desconocido en el resto del mundo. Dos siglos más o menos llevan los científicos estudiándolo y, no obstante, quedan grandes lagunas por colmar en la historia natural de este mamífero ovíparo. Buena parte de la información que se transmite como saber popular se basa en datos incompletos.

Pero las observaciones de campo, recientes y continuadas, de sus actividades cotidianas y de sus hábitos estacionales han contribuido muchísimo al estado actual del conocimiento de su biología. En particular, hemos empezado por dilucidar su comportamiento reproductor. Este trabajo, sumado a los datos históricos, los estudios de laboratorio y otras observaciones hechas por nosotros y por nuestros colegas, ha aclarado aspectos del proceso de apareamiento, del período de gestación y de las fases precoces del desarrollo de la cría recién salida del huevo.

PEGGY D. RISMILLER y ROGER S. SEYMOUR comparten el interés por la biología de los monotremas. Rismiller, fisióloga, vive y trabaja con sus animales de investigación en Kangaroo Island, Australia del Sur. Se doctoró por la Universidad de Philipps en Marburgo. Su campo de investigación se centra en los ritmos circadianos; en particular, la regulación de la temperatura corporal, metabolismo, hibernación y actividad reproductora. Seymour, que se doctoró por la Universidad de California en Los Angeles, da clases de fisiología en la australiana de Adelaida. Se interesa por el transporte de gases en la sangre y la fisiología del huevo.

Sólo el conocimiento cabal de la biología del equidna nos facultará para medir los peligros que plantea la intromisión del hombre en su hábitat. Ni siquiera con los hallazgos de nuestra reciente investigación, sabemos todavía lo suficiente del equidna para protegerlo, a él y a su ambiente, y conjurar la amenaza de extinción.

En 1792, cuando George Shaw, de la Real Sociedad Zoológica de Londres, recibió el primer equidna para su descripción científica, se quedó perplejo. La presencia a la vez de espinas y pelo le hizo suponer en un principio que se trataba de un nuevo género de puercoespín. La única información que acompañaba al animal espinoso, robusto y hocicudo, era: "capturado en Nueva Holanda, sobre un hormiguero". Por culpa de esa nota y de los rasgos evidentes del animal (hocico largo y desnudo, lengua larga y cilíndrica), cometió el error de relacionar el equidna con el oso hormiguero sudamericano (*Myrmecophaga*).

Diez años más tarde, Sir Everard Home, un anatomista británico, descubrió semejanzas anatómicas significativas entre el equidna y el ornitorrinco; y estableció su parentesco. El equidna poseía un seno urogenital, cavidad insólita en los mamíferos, en cuyo interior vierten todos los órganos internos. Equidna y ornitorrinco poseen una sola abertura, la cloaca, para el paso, desde el seno urogenital, de los productos intestinales, urinarios y reproductores. En razón de esa estructura compartida, el equidna y el ornitorrinco fueron agrupados en el orden Monotremas, que significa "un solo agujero".

Viven tres géneros de monotremas: el equidna de hocico corto (*Tachyglossus aculeatus*), el equidna de hocico largo (*Zaglossus bruijni*) y el ornitorrinco (*Ornithorhynchus anatinus*). Sólo existe una especie de equidna de hocico largo, y se encuentra exclusivamente en Nueva Guinea; una sola hay también de ornitorrinco, cuya distribución natural abarca la costa oriental de Australia y Tasmania.

En cambio, los equidnas de hocico corto se encuentran por toda Australia. Se distinguen seis subespecies, a tenor de la longitud de sus espinas, su pilosidad y la longitud relativa de la tercera garra posterior en comparación con la segunda. Los equidnas emplean sus garras posteriores alargadas para asearse. Los ágiles miembros traseros les permiten llegar hasta las agudas espinas dorsales o alcanzar, si prefieren, el hirsuto vientre.

Además del seno urogenital, el equidna y el ornitorrinco comparten una singularidad reproductora que los separa de todos los demás mamíferos: ponen huevos. Aunque los aborígenes australianos y quizá los primeros colonos conocían el fenómeno, los científicos se mantuvieron escépticos sobre este hecho durante los 92 años subsiguientes a la descripción zoológica original.

Sir Richard Owen, otro anatomista británico, creía firmemente que los monotremas eran ovovivíparos (lo que significa que portaban el huevo en el útero hasta el nacimiento). En 1864 recibió una carta de un médico australiano que afirmaba que un ornitorrinco cautivo había puesto dos huevos. Pero la noticia no puso en tela de juicio su suposición: Owen creía que el animal abortó los huevos debido al estrés. Su teoría del ovoviviparismo persistió durante otros 20 años.

1. BOLSA DEL EQUIDNA, formada por las glándulas mamarias dilatadas y los músculos longitudinales del lado ventral. La hembra, que está relajada, deja ver el interior de su bolsa.





2. EQUIDNA AÑAL; mientras forrajea en busca de hormigas queda cubierto por tierra, que ingiere junto con los insectos depredados. Los equidnas son destetados a los siete u ocho meses de edad.

En 1884 J. Wilhelm Haacke, director del Museo de Australia del Sur en Adelaida, decidió observar más detenidamente al equidna. A pesar de la dificultad que entraña su caza, se le envió una pareja desde Kangaroo Island, un islote meridional de Australia. Unas semanas después de que llegaran, Haacke advirtió que la hembra tenía una bolsa bien desarrollada. Examinó a la hembra, esperando descubrir un joven equidna, pero con gran sorpresa extrajo un huevo redondo y pequeño del interior de los pliegues longitudinales del vientre. Haacke estaba tan fascinado con el huevo, de consistencia gomosa como los de los reptiles, que lo rompió al apretarlo.

Contemporáneamente al descubrimiento de Haacke, el naturalista escocés William H. Caldwell encontró un huevo en la bolsa de un equidna que los aborígenes cazaron para él. Poco después, adquirió un ornitorrinco con un huevo acabado de poner. Inmediatamente envió su famoso telegrama: "Monotremas ovíparos, óvulo meroblástico", leído en la Asociación Británica de Montreal el 2 de septiembre de aquel año de 1884. (En traducción libre, el telegrama afirmaba que los monotremas ponían huevos y que los óvulos experimentaban una división sólo parcial, similar al desarrollo embrionario de aves y reptiles.) La noticia de la existencia de mamíferos ovíparos causó una conmoción en la comunidad científica. También dio pie a osadas teorías que postulaban la evolución del hombre a partir de los reptiles. Después de todo, los monotremas representaban una fantástica mezcla de rasgos reptilianos y mamíferos. Aun cuando se descartaran muy pronto las hipótesis más infundadas, el debate sobre el origen de los monotremas sigue apasionando hoy, en parte por la pobreza de su registro fósil.

Muchos zoólogos apoyan la hipótesis, planteada por el biólogo William K. Gregory en 1947, según la cual monotremas y marsupiales poseerían cierto parentesco filogenético y evolucionarían a partir del mismo antepasado, probablemente marsupiales primitivos. Una segunda teoría, que goza de amplia aceptación, considera a los monotremas los últimos supervivientes de un grupo no euterio (animales carentes de placenta) de mamíferos primitivos, que se originó hace unos 150 millones de años. Esta idea supone que los monotremas evolucionaron independientemente de todos los demás mamíferos actuales.

El telegrama de Caldwell impulsó las investigaciones de campo de los hábitos reproductores de los monotremas. En 1891, intrigado por los informes sobre un mamífero que ponía huevos, el biólogo alemán Richard W. Semon viajó a Australia para conocer mejor el equidna. Su primera tarea (observar los animales en un extraño, para él, terreno australiano) no era precisamente sencilla.

El equidna lleva una vida críptica, por lo general solitaria. Se muestra activo de día o de noche según la estación y el hábitat. Para el oído habituado, el andar reptante de un equidna por la maleza difiere del paso de la mayoría de aves y micromamíferos. Pero el equidna suspende toda actividad cuando oye o nota acercarse a un intruso. El animal se queda inmóvil, indistinguible de su entorno. Hemos observado un ualabí que saltaba junto a un equidna que estaba buscando comida, sin que éste moviera ni una espina. También los canguros pueden a veces acercarse a un equidna o golpearlo ligeramente, sin notar su presencia.

El paradero de un equidna puede determinarse por lo general a partir de sus actividades de alimentación y excreción. Un pequeño surco triangular con un agujero redondo en su vértice, en arena o suelo blandos, es una señal delatora del hocico de un equidna en busca de comida. Los termiteros destrozados por garras poderosas y medio devastados son otras indicaciones de su festín, al igual que sus inconfundibles cortaduras de extremos romos. Las heces presentan una membrana lubricante que recubre la tierra ingerida y los restos quitinosos de hormigas y termes, que suponen la mayor parte de la dieta del equidna de hocico corto. A pesar de tantas pistas, el animal propiamente dicho suele permanecer invisible.

Los mismos colonos que habían vivido muchos años en el área de estudio de Semon admitían que nunca habían visto equidnas en libertad. Semon decidió contratar aborígenes para que buscaran a los escurridizos animales. "La captura sistemática de este mamífero sólo es posible con el sentido de rastreo intuitivo y los ojos de halcón de los australianos nativos." Atribuía el éxito de los aborígenes al predicamento de bocado delicioso que tenía el equidna asado entre ellos, gusto que Semon no compartía.

Semon pasó los meses de invierno estudiando los monotremas, aconsejado por los aborígenes, que sabían que ésa era la época de cría. Durante dos años de trabajo de campo, los aborígenes le capturaron más de 400

ejemplares. Aunque ofreció un precio más elevado por las hembras, sólo le consiguieron 127 (una relación sexual de uno a tres, aproximadamente). Hemos encontrado una proporción similar de hembras a machos al cazarlos durante la estación de reproducción. Esta razón quizá represente un sesgo estacional, hipótesis que estamos investigando.

Semon siguió y describió los estadios de desarrollo del huevo y del embrión *in utero*, así como los de la cría en la bolsa. Sus investigaciones sobre el tamaño de ovarios y testículos le llevaron a la conclusión de que el equidna cría una vez al año, entre julio y septiembre. Con la ayuda de los aborígenes, documentó asimismo la existencia de cuidados paternos.

La investigación de Semon apareció entre 1894 y 1913 en una serie de monografías espléndidamente ilustradas titulada *Zoologische Forschungsreisen in Australien* [*Viajes de investigación zoológica en Australia*]. Aunque espléndidos, sus resultados no hicieron más que empezar a dar respuesta a las preguntas que Owen había planteado sobre el equidna en 1864. Todavía faltaba información sobre sus hábitos y estación de cópula, la duración de la gestación, la naturaleza de las estructuras secundarias que nutren al feto y le proporcionan oxígeno, el tamaño, condición y capacidades de las crías inmediatamente después del nacimiento y mientras maman y, finalmente, la edad a la que el animal alcanza el tamaño adulto o adquiere la madurez sexual.

Casi 125 años después, quedaban cuestiones por resolver sobre la biología reproductora de los monotremas. Así las cosas, uno de nosotros (Seymour) inició un estudio del desarrollo respiratorio y metabólico del huevo del equidna durante la incubación. El primer problema volvió a ser el de "cazar nuestro equidna". Descubrimos que llevan una vida reservada y solitaria; se precisaban cientos de horas de campo para localizar una población adecuada para su estudio. Sin embargo, una vez hubimos encontrado suficientes ejemplares a los que seguir, la radiotelemetría nos permitía localizarlos de nuevo con cierta frécuencia.

Cuanto más trabajábamos en el campo, más nos dábamos cuenta de lo poco que se había registrado sobre la historia natural del equidna. La información sobre el comportamiento reproductor en la naturaleza faltaba por completo. Diez mil horas de trabajo de campo y la ayuda infatigable de Earth Watch y de voluntarios locales empezaron a propiciar algunas respuestas. Mediante el rastreo diario y observaciones diligentes hemos descubierto algo más que la pauta de apareamiento del discreto equidna.

Los primeros investigadores estaban interesados por su forma de reproducción. Forzosamente tenían que limitarse a ejemplares preservados. Se sacaba, pues, muy poco de las costumbres naturales del animal. Deseábamos conocer los pormenores del ciclo biológico del equidna, empezando por el período reproductor. ¿Cómo salen estos animales solitarios los unos al encuentro de los otros durante la estación de reproducción? ¿Qué interacciones sociales tienen lugar? ¿Cómo se aparean sin producirse heridas?

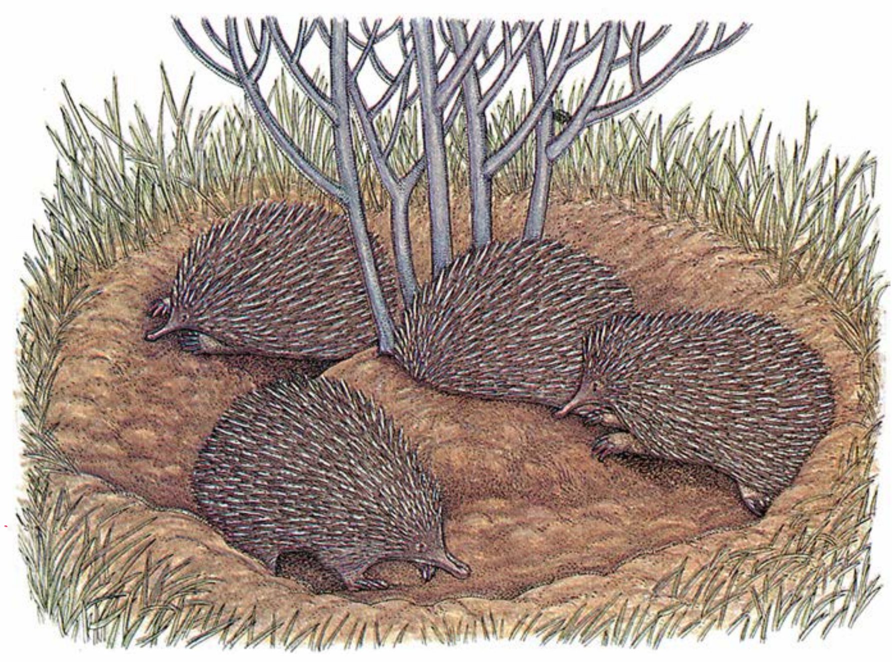
Durante el período reproductor, los machos buscan afanosamente las hembras cuan distantes estén y forman "séquitos". Hemos encontrado séquitos constituidos por dos a siete individuos, enfilados uno detrás de otro en hilera india. En cada séquito que examinamos, el equidna que lo encabezaba era una hembra. El animal más pequeño y con frecuencia el más joven solía ocupar el cierre de la fila.

Los biólogos ignoran cómo descubren los machos a las hembras, pero mientras nos hallábamos tendidos en el suelo, a un metro de distancia de un grupo de equidnas en proceso de cortejo, advertimos un fuerte olor almizcleño que la hembra despedía. (Semon registró que machos y hembras emitían un olor acre durante la época de cría; nosotros no hemos conseguido todavía distinguir entre los perfumes sexuales de unos y otras.)

En Kangaroo Island (nuestro principal lugar de estudio) se han observado séquitos de equidnas desde mediados de mayo hasta principios de septiembre. Creemos que la formación de esas cohortes marca el inicio del período de cortejo. Se han observado esas filas en cunetas de la carretera, en corrales para las ovejas o en bosque abierto. También las hemos descubierto mientras registrábamos colinas arenosas con vegetación densa o chaparrales llanos, todas ellas áreas donde el equidna habita.

Sorprendido un séquito, procedemos a codificar, mediante colores, a cada equidna para su posterior identificación. Deslizamos a tal fin tubos de aislamiento de color a lo largo de una espina. Se coloca un pequeño radiotransmisor sobre el dorso del animal antes de soltarlo en el lugar de la captura. Así puede seguirse siempre el rastro sin perturbar la actividad normal del individuo.

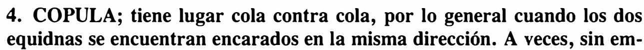
Durante la época de cortejo, se pueden encontrar grupos de equidnas forrajeando, andando o simplemente reposando juntos hasta cuatro semanas antes de que aparezca el comportamiento de apareamiento. Se ha visto que uno o más machos empujan con sus hocicos el extremo caudal de la hembra, husmeando su dorso o costado, de la cola a la cabeza. Los machos tenaces pueden re-



3. RODERA DE APAREAMIENTO excavada alrededor de una hembra por un séquito de machos pretendientes, mientras la hembra se sujeta a un árbol. Estos círculos en rosquilla, con profundidad variable de 18 a 25 centímetros, intrigaron durante muchos años, a los visitantes del chaparral.







4. COPULA; tiene lugar cola contra cola, por lo general cuando los dos equidnas se encuentran encarados en la misma dirección. A veces, sin embargo, los animales se sitúan en sentidos antagónicos. El macho yace sobre un costado y acomoda entonces su cola bajo la cola de la hembra.

petir este ritual durante una hora. Si la hembra no es receptiva, se arrolla y forma una apretada bola, para dejar expuesto su dorso espinoso. Por lo general esta postura atenúa el ardor del macho, que se aleja (al menos, por un rato).

Cierta mañana desapacible, de lluvia y viento, uno de nosotros (Rismiller) se dispuso a seguirle el rastro a una hembra que habíamos observado incorporada en un séquito durante 14 días. Aunque los libros dicen que los equidnas no salen en día lluvioso, la hembra y tres machos se hallaban en la ladera de una colina con mucha vegetación. La cabeza de la hembra miraba colina arriba, y sus pies anteriores la mantenían sujeta a la base de un árbol bajo. Se encontraba relajada, con las púas caídas (tendidas hacia abajo); yacía con el cuerpo aplanado y el vientre pegado al suelo. Había un macho tumbado a su lado, mientras los otros la empujaban con el hocico. Parecía que la hembra estaba a punto de aparearse.

Los tres machos, todos ellos con marbetes coloreados, trenzaron una fila continua alrededor de la base del árbol y de la hembra. De vez en cuando se detenían y un macho excavaba la tierra a cada lado de la hembra, así como alrededor de su cola. A veces, los machos invertían la dirección mientras cavaban alrededor de la hembra y la hociqueaban. Esta permanecía plácida a medida que la trinchera se ahondaba a su alrededor y en torno al árbol. (Más tarde pusimos el nombre de rodera de apareamiento a la zanja en forma de rosquilla.)

Llegado cierto momento, el macho mayor se volvió hacia uno de los que lo seguían. Se toparon cabeza contra cabeza y forcejearon por arrojarse fuera de la rodera. El tercer macho se retiró sin incorporarse a la competición y se tendió a una distancia de aproximadamente un metro de los otros. La excavación y la lucha a empellones se repitieron hasta que sólo quedó un macho. La hembra, todavía inmóvil y tendida sobre su vientre, no dejó en ningún momento de apoyarse con sus pies anteriores en la base del árbol.

Libre de competidores, el macho concentró su esfuerzo en cavar alrededor del extremo posterior de la hembra, empujando con el hocico de manera intermitente bajo su cola. Una vez consiguió levantar con éxito el extremo caudal de la hembra con su pata anterior, pasó su pie anterior a lo largo del dorso de la hembra, cuyas púas se ondularon con la caricia. El alzamiento del extremo posterior y las caricias a las púas continuaron mientras el macho se iba disponiendo sobre su costado, acomodándose en la rodera de apareamiento.

En esta posición el macho podía colocar sin dificultad su cola bajo la de la hembra. El apareamiento tuvo lugar cloaca contra cloaca. Pude ver una acción bombeante conjunta de las colas, así como una tensión y relajación de las púas en ambos equidnas. Permanecieron juntos una hora, más o menos. Después, con el pene todavía extendido, el macho abandonó la rodera de apareamiento (que medía 18 centímetros de profundidad). La hembra se marchó poco después hacia la maleza. Habían pasado cinco horas desde que empezó el apareamiento; todavía estaba lloviendo.

Hemos visto también apareamientos con sólo un macho presente. En estos casos, las zanjas abiertas por los extremos sustituyen las roderas de apareamiento circulares. La excavación se centra en un costado de la hembra y alrededor de su extremo caudal, hasta que el macho puede levantar el cuarto trasero de ésta y acomodar su propia cola bajo la cola de la hembra. La cópula tiene lugar en una de dos posiciones posibles: las dos cabezas ordenadas en la misma dirección o cada una de ellas orientada en direcciones opuestas [*véase la figura 4*]. En ambos casos, las colas se encuentran enganchadas; el macho está tumbado sobre un costado (hasta el punto de que casi puede dar la vuelta cuando no se ha excavado ninguna depresión) y la hembra yace tendida sobre su propio vientre.

De acuerdo con las viejas informaciones, los equidnas sólo se apareaban en la madriguera. Hemos observado, por contra, bastantes apareamientos que tuvieron lugar resguardados por la vegetación baja, en

campo abierto y sobre el suelo. También hemos visto séquitos de cinco animales juntos en una madriguera, en la que se había producido mucha excavación. Antes de estas observaciones recientes, nadie había hablado del apareamiento entre equidnas en libertad.

Se ha investigado el desarrollo embrionario del feto *in utero*, pero sobre la eclosión y el crecimiento de las crías se ha escrito poco. Las primeras observaciones de la gestación fueron realizadas por el naturalista Robert Broom en 1895, cuando se le suministraron dos equidnas, macho y hembra, que habían sido capturados "en cópula". El macho se negó a comer y beber y murió 14 días después. El vigesimooctavo día después de la captura la hembra puso un huevo. Broom sospechaba que el macho habría sido físicamente incapaz de inseminar a la hembra después de la primera semana en cautividad "debido a su condición delicada", de lo que se infería que el período mínimo de gestación fuera de 21 días y el máximo de 28 días.

En 1969 Mervyn Griffiths, autoridad mundial en monotremas [véase "El ornitorrinco", de Mervyn Griffiths; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1988], y sus colaboradores encontraron una hembra de equidna acompañada por dos machos. Diecisiete días después puso un huevo. Se encontró otra hembra con machos y fue separada de ellos. Pasados 34 días no se había formado ninguna bolsa, pero la autopsia reveló un huevo en el útero. Griffiths cree que un período de gestación de 34 días es demasiado largo y presume que el equidna, como algunos marsupiales y reptiles, podría almacenar esperma.

Aunque no observamos el apareamiento de cada una de las hembras cuyo rastro seguimos, comprobamos que los machos del séquito abandonaban a la hembra entre 21 y 28 días antes de que ésta pusiera su huevo. Esta cronología puede significar que la atracción sexual, inductora de la formación de los séquitos y quizá de su persistencia también, desaparece con la fecundación de la hembra.

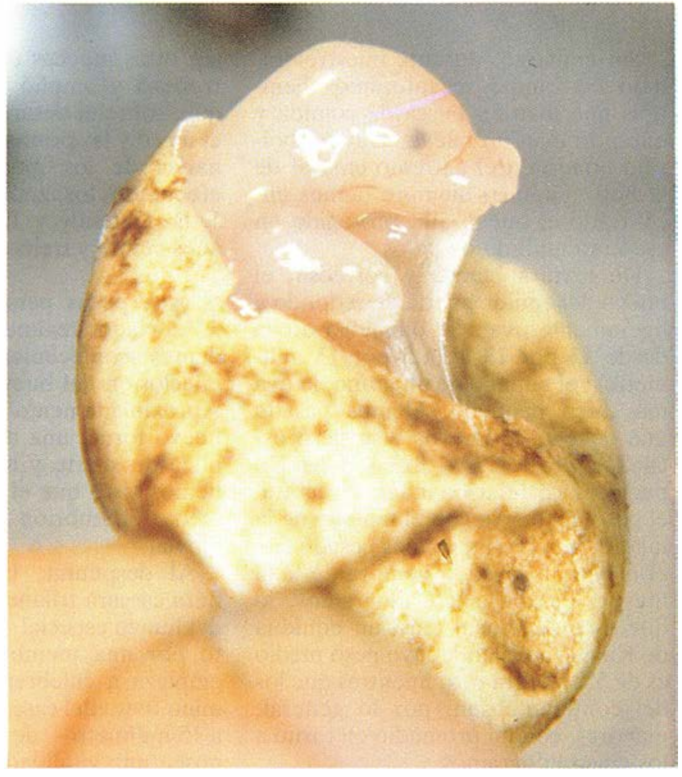
Nadie ha visto nunca de qué manera el huevo pasa de la cloaca (adonde es expulsado) a la bolsa. Semon dejó escrito que no podía "informar nada acerca de cómo la madre consigue colocar el huevo en la bolsa, portando unas extremidades tan regordetas y un hocico en forma de trompa. El tamaño del huevo, comparado con la estrechez de la boca, excluye que éste pueda tomarse entre los labios. Quizás el equidna empuja el huevo sobre el suelo y lo arrima al interior de la bolsa con su hocico".

Griffiths observó que la cloaca de una hembra que había puesto un huevo recientemente se prolongaba casi hasta el extremo posterior de su bolsa. La observación sugiere la posibilidad de poner un huevo si se adoptara una posición sedente. Con frecuencia hemos visto individuos sentados, erguidos sobre la cola, sin ningún soporte dorsal, aseando el pelaje ventral con el hocico. En esta posición la cloaca del animal puede extenderse fácilmente para alcanzar los pliegues laterales de la bolsa.

El saber popular sostiene que pasado cierto tiempo de gestación, la hembra se retira a una especie de madriguera de maternidad donde pone su único huevo. Hasta hace poco, se creía que la hembra permanecía en la madriguera, ayunando durante el período de incubación, para no salir hasta que el huevo hubiera hecho eclosión. Los músculos abdominales longitudinales que forman la bolsa no les parecieron lo suficientemente fuertes a los primeros observadores como para poder retener sin riesgo un huevo mientras la madre se desenvolviera fuera de la madriguera.



5. EMBRION dentro del huevo, tal como lo dibujó y publicó Richard W. Semon en el año 1894. Ilustró el vitelo a un lado y el sistema vascular extendido alrededor de la región umbilical del embrión de equidna.



6. CRIA EMERGENTE de su huevo oval y correoso. El diente del huevo, cubierto de esmalte, que ha de partir la dura cáscara trilaminar, es prominente en este equidna recién eclosionado. (Foto de McKelvey y Rismiller.)



7. JUVENIL extraído de la bolsa. A los 45 días aparece todavía desnudo pero empieza ya a volverse gris, señal de que comienza el crecimiento de pelo y púas. A la izquierda, su hendidura auricular.

Sin embargo, durante nuestro trabajo de campo recapturamos hembras que iban en busca de comida y que portaban un huevo. Hay un bolsillo hondo en el extremo cloacal de la bolsa elíptica. Siempre hemos encontrado el huevo allí, protegido en ese nido mullido de pelos.

De textura blanda y correosa, el huevo del equidna varía de redondo a ligeramente oval. Su diámetro oscila desde 13 por 13 a 16,5 por 13 milímetros, el tamaño de un grano de uva más bien pequeño. Hemos pesado una docena de huevos y su peso oscilaba entre 1,323 y 1,893 gramos. No pudimos correlacionar con exactitud el peso del huevo con el tamaño de la madre, pero el huevo más pesado (no el mayor) lo puso la hembra de talla mayor. Pesaba cinco kilogramos, lo que es excepcional para un equidna de Kangaroo Island, cuyo peso medio es de 3,8 kilogramos, mientras que los del continente son, por lo general, mayores, con un promedio en torno a los cinco kilogramos.

El huevo se incuba en la bolsa materna durante 10 o 10,5 días antes de la eclosión. Griffiths determinó este extremo examinando dos veces al día la bolsa de hembras cautivas. Entre sus otras muchas contribuciones, corroboró y amplió las observaciones que, sobre el desarrollo del huevo en el útero y las primeras etapas embrionarias de los monotremas, habían efectuado los zoólogos J. P. Hill, J. B. Gatenby y T. T. Flynn en los años veinte y treinta de nuestro siglo.

Muy pocas personas han presenciado realmente los sorprendentes acontecimientos que rodean a la eclosión del huevo de un equidna. Aproximadamente un día antes, el huevo forma una depresión. Con un poco de suerte y tenaz observación, hemos visto que el huevo (probablemente el embrión de su interior) se movía.

Al despuntar, la cría perfora la dura cáscara trilaminar con un diente del huevo especial. Todavía recubierto por una membrana, el pequeño empieza a culebrear y a abrirse camino fuera del cascarón. Mide sólo 13 a 15 milímetros, de cresta a cola, y ya posee una vitalidad y una resistencia admirables. Mezcla latigazos enérgicos con períodos de reposo hasta que se encuentra libre en la bolsa. Nace con ojos rudimentarios, cubiertos por la piel.

Aunque las extremidades posteriores aparecen como simples yemas, las patas y dedos anteriores ya están bien formados y provistos de garras transparentes y diminutas, para asirse al pelo de la bolsa. Debido a que el huevo suele estar situado en el extremo posterior de la bolsa, la cría recién salida del huevo tiene que recorrer una distancia de seis o más veces la longitud de su propio cuerpo para obtener su primera comida.

A diferencia de marsupiales y demás mamíferos, el equidna no posee pezones que amamanten a la cría. Hay glándulas mamarias, que se sitúan por delante y a cada lado de la bolsa. Terminan en la aréola; esta mancha de leche, así se la llama, contiene de 100 a 150 poros separados, cada uno de ellos con un folículo piloso mamario cuya estructura difiere de la que caracteriza a los otros pelos. La cría, que pesa sólo de 0,27 a 0,39 gramos al nacer, encuentra su camino hasta la mancha de leche; sigue siendo un enigma cómo lo consigue. Sus aberturas nasales son excepcionalmente grandes; Griffiths ha señalado que sus sentidos olfativos están bien desarrollados y son funcionales.

Cuando sale del huevo, el cuerpo de la cría es semitransparente; se le aprecian los restos del saco vitelino. Hemos observado al recién nacido, cuatro horas después de la eclosión, agarrándose a los pelos de la aréola y con su estómago distendido y repleto de leche. Contrariamente a lo que nos han transmitido, los jóvenes equidnas maman pero no lamen la leche. A esa conclusión llegó Griffiths tras haber estudiado la forma y la función de la lengua de crías alojadas en sus bolsas.

Los jóvenes de bolsa crecen con una celeridad extraordinaria. Las crías que pesan menos de medio gramo pueden aumentar su peso hasta los 400 en unos 60 días. Brian Green y sus colaboradores, de la Organización de Investigación Científica e Industrial de la Commonwealth en Canberra, midieron la ingestión de leche y el aumento de peso en equidnas lactantes; descubrieron que la tasa de crecimiento guardaba relación con el tamaño de la madre. La ingestión de leche iba de 7,6 a 36,4 mililitros diarios, lo que producía un aumento de peso correspondiente de 3,8 a 12,6 gramos por día.

Para mantener la enorme producción de leche que se requiere para alimentar a la cría, la madre pasa gran parte del tiempo en busca de comida. Hemos seguido a hembras lactantes durante muchas horas consecutivas. Se desplazan por la maleza a un paso uniforme, levantando piedras y escar-

bando bajo troncos caídos y podridos en busca de larvas de insectos y de termes. Una hembra cuyo recorrido cartografiamos recorrió más de tres kilómetros en un solo día.

Algunas de las actividades de alimentación de la madre ponen en peligro al hijo que está en la bolsa. En Kangaroo Island, las hormigas de carne (*Iridomyrmex* gén.) constituyen un alimento muy solicitado de julio a noviembre. Aunque no suelen comer hormigas adultas, los equidnas saborean el elevado contenido en grasas de las reinas vírgenes, que deambulan más cerca de la superficie del suelo en esta época del año. Su denso pelaje y púas protegen a la madre de los mordiscos de las hormigas mientras devasta sus cámaras de incubación. Vimos, sin embargo, que una cría indefensa, después de ser atacada por hormigas de carne, se soltaba de su asidero a la madre y resbalaba de la bolsa protectora. La madre se fue y la cría, abandonada, pereció.

Ignoramos si una hembra que ha perdido su huevo o su cría de bolsa a principios de la estación reproductora puede volver a engendrar el mismo año. Aunque parecen tener un período reproductor por año, no se sabe de ninguna hembra que quedara preñada año tras año. En 1881, el naturalista George Bennett aventuró que la hembra producía sólo un descendiente a años alternos, teoría que no ha sido refutada. Algunos sugieren que la longevidad compensaría la reproducción infrecuente del equidna. (En el parque zoológico de Philadelphia vivió 49 años un ejemplar cautivo; el récord en libertad es de 16 años.)

Los aborígenes contaron a Semon que el equidna seguía en la bolsa hasta que le despuntaban las espinas. La madre dejaba entonces a la cría todavía dependiente en la madriguera y retornaba periódicamente para amamantarla. Griffiths determinó, hace varios años, que las crías viven en la bolsa una media de 53 días, antes de que crezcan más que el tamaño de la misma. Griffiths y sus colegas observaron, asimismo, equidnas lactantes que se movían con libertad por el terreno. Encontraron que los intervalos entre los amamantamientos en las madrigueras variaban de cinco a diez días. La ingestión de leche en cierto amamantamiento llegó hasta el 20 por ciento del peso corporal de la cría. Entre una y otra toma, la hembra recorría grandes distancias. Junto con otro grupo de investigadores, Griffiths descubrió que la composición de la leche de la hembra cambiaba con el desarrollo del hijo. Anotaron, por último, que el período de lactancia duraba unos 200 días.

La madriguera donde se ponga la cría a resguardo puede ser de muchos tipos: desde un cobijo cálido y seco, excavado bajo un termitero, hasta una cámara situada bajo un montón de desperdicios de jardín, cercano a edificios y a una carretera transitada. Ni siquiera dentro del primer cobijo se halla el joven equidna a salvo de los depredadores naturales. En más de una ocasión hemos visto un goana (un gran lagarto) de Kangaroo Island intentando comerse uno. Siempre el animal resultaba demasiado grande para ser ingerido; pero moría de las heridas. En otras regiones, los grandes ofidios pueden también alimentarse de las crías de madriguera que todavía no han desarrollado espinas largas. Hoy el mayor peligro depredador en toda Australia lo presentan gatos asilvestrados, zorros y perros.

A pesar de nuestro conocimiento cada vez mayor de la reproducción y el desarrollo del equidna, seguimos ignorando, en buena parte, su esperanza de vida y sus hábitos diarios en la naturaleza. Los estudios que estamos realizando intentan esclarecer varios puntos. Quisiéramos saber, por ejemplo, si persiste la relación entre la madre y su cría una vez que ésta abandona la madriguera, y en qué grado, o si la naturaleza inquisitiva innata del joven le basta para su supervivencia. Puesto que los equidnas añales no son sexualmente maduros, esperamos descubrir la edad de la capacidad reproductora y si los dos sexos maduran a la misma edad.

El equidna es un animal nativo australiano singular. Ampliamente distribuido, y común por lo que parece, no hay datos para aventurar con qué número se define una población vigorosa. Ante la agresión del hombre, de ayer y de hoy, muchos animales nativos y sus hábitats necesitan protección, y el equidna está entre ellos. Sin embargo, no puede emprenderse ninguna acción con criterio mientras no se conozcan mejor la biología y la ecología del animal. Todavía no contamos con pruebas suficientes que aporten una documentación sólida para establecer los requisitos que exige la conservación de esta vieja especie.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EQUIDNAS. Mervyn Griffiths. Pergamon Press, 1968.

THE BIOLOGY OF MONOTREMES. Mervyn Griffiths. Academic Press, 1979.

PLATYPUS. Tom Grant. New South Wales University Press, 1984.

Computación y arquitectura

Algoritmos avanzados de modelizado y presentación permiten pasear por el interior de los edificios mucho antes de ser construidos

Donald P. Greenberg

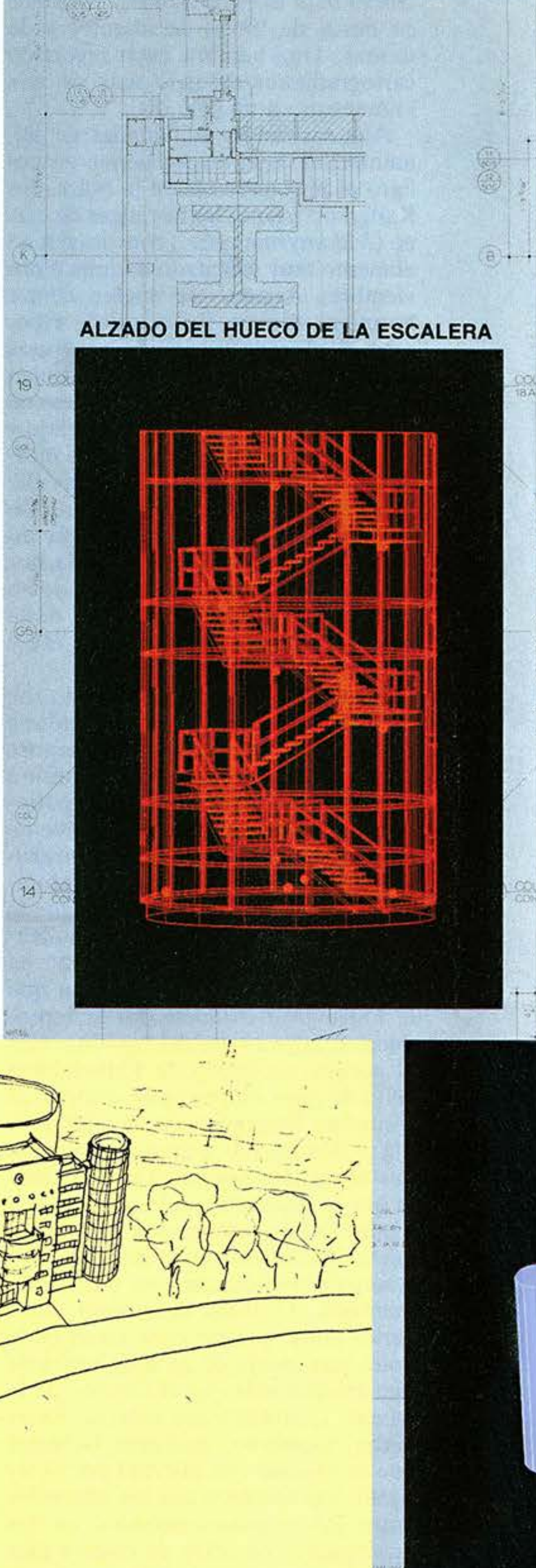
Al proyectar un edificio y sus espacios interiores, los arquitectos siguen fiando en bocetos, trazados no pocas veces en servilletas y reversos de sobres usados. Sus clientes y ellos mismos evalúan los proyectos terminados basándose en planos y dibujos trazados a mano, o en maquetas a escala confeccionadas con gran minuciosidad. Muchos de los llamados programas de diseño asistido por ordenador que utilizan los arquitectos no son más que ayudas informáticas para la delineación. Automatizan la producción de planos de obra, pero no proporcionan impresiones perceptuales, ni los matices de color, sombras, textura y movimiento, tan necesarios para la evaluación de un espacio arquitectónico.

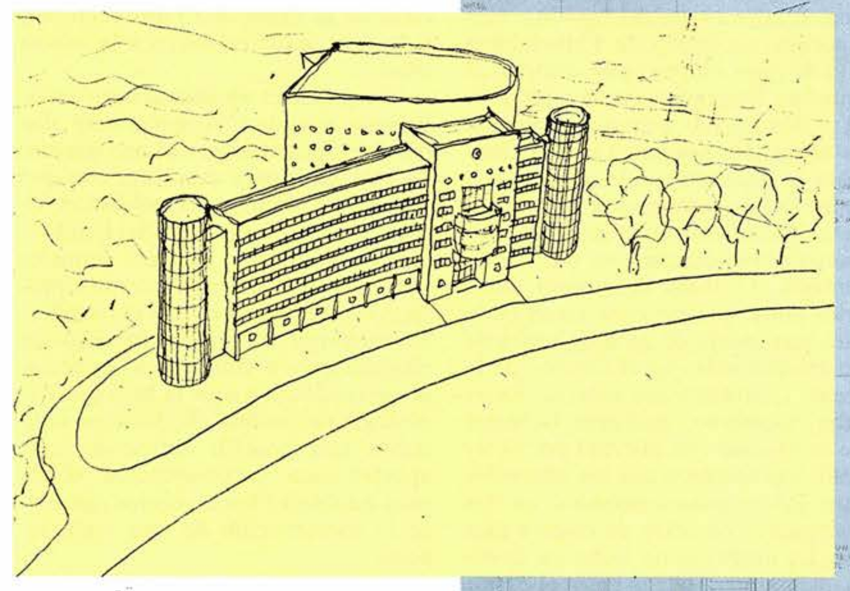
Sin embargo, hay nuevos programas que descargan al proyectista de pesadas tareas de dibujo y le proporcionan una mayor libertad para explorar sus nuevas ideas, no sólo en dos dimensiones, sino en tres. Los arquitectos pueden elaborar todo el proceso de proyecto preliminar: esbozo y exploración de alternativas estéticas, depuración de sus diseños y generación de imágenes realistas.

Estos refinados programas producen imágenes mucho más útiles que los dibujos y maquetas al uso. Las imágenes son capaces de plasmar sutiles juegos y matices de luces y sombras; además, resulta posible mostrarlas en secuencia rápida y crear la impresión de movimiento a través del edificio, con el aspecto que ofrecería una vez construido.

La programación de aplicación arquitectónica ha de atender a las especiales características y a las peculiaridades únicas del arte de proyectar en arquitectura. Y lo que es más importante, el proceso de diseño es un proceso interactivo; cuando los arquitectos, al refinar un proyecto, encuentran bloqueado el camino, se ven forzados a retroceder a una fase anterior y reconsiderar sus decisiones iniciales. En cada estadio, el modo de comunicación experimenta cambios sutiles. El proceso inicial comienza

DONALD P. GREENBERG, doctor en ingeniería estructural desde 1968, es director del programa de grafismo informático de la Universidad Cornell, donde enseña también arquitectura.





1. DISEÑO ARQUITECTONICO: parte de esbozos simples (arriba) *y avanza a través de fases cada vez más detalladas, hasta llegar a los planos de trabajo, a partir de los cuales se construye una estructura. Los nuevos programas y equipos pueden facilitar las etapas del proceso.*



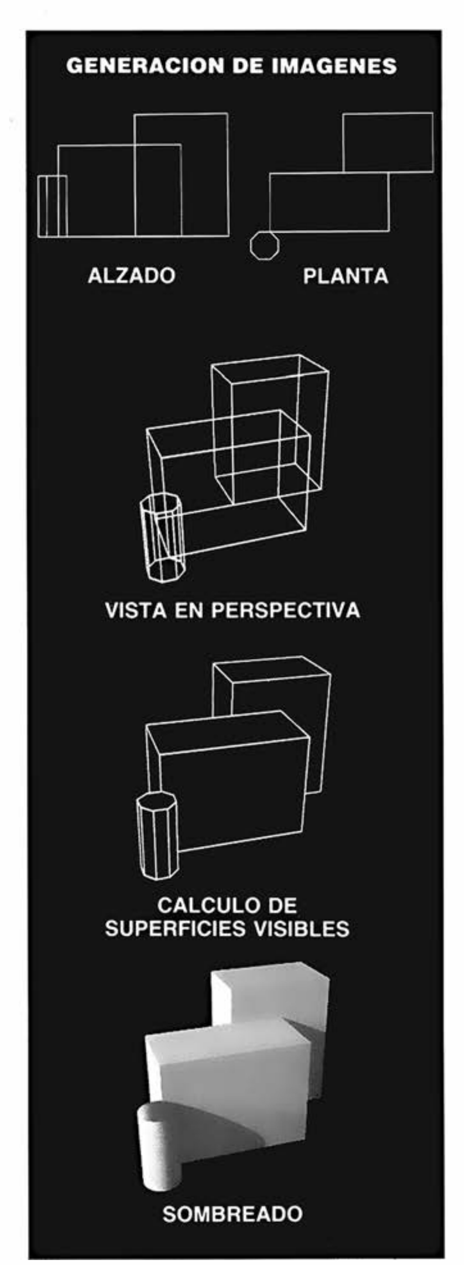
PRESENTACION DEL INTERIOR

ESTUDIO DE VOLUMENES

PLANOS DE TRABAJO

"haciendo monos" en papel cuadriculado, o parte de bocetos tal vez dibujados en el reverso de un sobre cualquiera. En fases posteriores, se va añadiendo más y más detalle y el boceto se va refinando, al precisarse las dimensiones y delimitarse los diversos espacios. El lápiz cede paso a la tinta. Se incorporan a los planos las puertas, ventanas y paredes.

La etapa preliminar del diseño se centra en el tamaño y la escala de un edificio y en sus relaciones con las estructuras vecinas existentes ya, apilando estudios tendentes a establecer la forma básica y la composición de la estructura, el cumplimiento del "pliego de condiciones" u otras normas programáticas, por ejemplo, el número de metros cuadrados que han de tener las diferentes secciones del edificio. La fase siguiente, el desarrollo del diseño, abarca el refino de planos, los alzados y secciones transversales, las pautas de circulación por el interior, la agrupación de espacios de uso público y privado, y la distribución de las estancias y habitaciones. La fase de elaboración y delineación de los planos de obra tiene la función de producir un conjunto de planos y dibujos que proporcionen las dimensiones exactas y las especificaciones sobre materiales, merced a las cuales es posible proceder a la construcción del edificio.



Los programas comerciales disponibles, concebidos para la eficiente producción de planos de obra, resultan demasiado rígidos para permitir el proceso de diseño interactivo. Los programas exigen demasiada información, y la exigen, además, bajo una forma demasiado precisa, por lo que no resultan útiles en los tanteos preliminares. Tampoco los programas de delineación se han ideado para generar presentaciones de alta calidad, presentaciones idóneas para transmitir la impresión que producen los espacios reales de un edificio.

Dicha tarea se venía encomendando a modelos y maquetas a escala. Tales modelos son caros, poco flexibles y, por lo general, sólo permiten observar el edificio o su interior "a vista de pájaro". No facilitan al arquitecto un verdadero sentido de la perspectiva, de los colores, texturas, calidades, matices y sombras que experimentarían quienes se desplazasen por el interior de la estructura final.

Tal pretensión sólo está al alcance del grafismo informático. Los extraordinarios progresos en programación y equipos informáticos conseguidos a lo largo de los últimos diez años consienten la generación de imágenes a todo color de escenas complejas, con velocidad suficiente para crear impresión de movimiento. Tales programas de modelizado pueden idear presentaciones y vistas de ambientes complejos que contienen materiales específicos de colores y texturas concretas: cemento, acero, vidrio, ladrillo. Los algoritmos de síntesis de imagen han avanzado ya lo suficiente como para establecer incluso sutiles matices de luz y sombra. Potentes estaciones de trabajo incorporan estos algoritmos y permiten la visión inmediata del resultado del diseño, autorizando la revisión interactiva de sus proyectos.

El proceso de creación de la imagen de una escena consta de cinco pasos. El arquitecto ha de empezar definiendo los objetos que la escena ha de contener, sus formas, ubicaciones, orientaciones, características de material y de acabado superficial. En el segundo paso se decide un punto de vista, proceso análogo al de emplazar una cámara fotográfica y seleccionar y enfocar la lente. El ordenador procede entonces a transformar los datos objeto con el fin de crear una imagen en perspectiva.

El tercer paso estriba en determinar qué superficies le son visibles al observador. En el mundo real, las leyes físicas resuelven automáticamente este problema, pero las escenas generadas por ordenador exigen largos tiempos para resolver el llamado problema de las superficies ocultas. Es preciso revisar todos los objetos de la escena para ver si existen superposiciones o traslapamientos.

En el cuarto paso se procede a simular la iluminación. La luz incidente en cualquier superficie de la escena es combinación de la directamente procedente de fuentes luminosas (cuya posición se ha especificado al mismo tiempo que la de otros objetos de la escena) y de la luz reflejada por otras superficies (iluminación indirecta). Además, la intensidad de la luz que llega al observador depende tanto de la luz incidente como de las propiedades de reflectancia de cada una de las superficies.

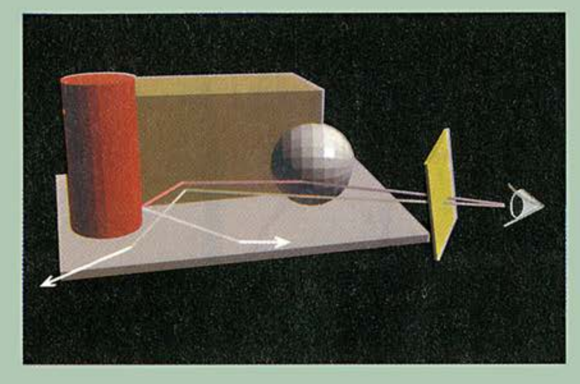
El último paso corresponde a la presentación. Los programas de presentación tienen que determinar la cantidad de luz que llegaría al ojo del observador desde la escena auténtica, y generar una imagen capaz de crear el mismo efecto visual.

Las modernas estaciones gráficas de alto rendimiento disponen de circuitos y procesadores especiales que se encargan directamente de llevar a efecto las transformaciones de perspectiva, la determinación de las superficies visibles y la ejecución de las rutinas de presentación. Estos equipos pueden también ejecutar los algoritmos precisos para modelizar una iluminación directa simple.

No obstante, la calidad de las imágenes proporcionadas por la mayoría de las estaciones de trabajo es bastante limitada. Resulta fácil reconocer que las imágenes se han generado por ordenador, porque en ellas no aparecen los efectos de las reflexiones mutuas de luz entre objetos. Donde más útiles se muestran es, por tanto, en la fase de modelización inicial. La evaluación del proyecto exige imágenes mucho más realistas, generadas por programas refinados y complejos. Además, para crear la ilusión de movimiento, tales imágenes se han de exhibir en rápida sucesión.

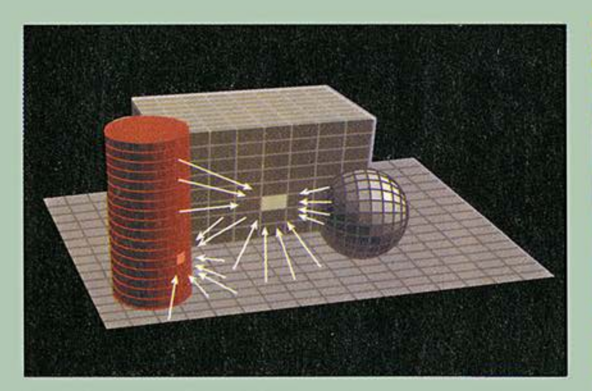
Los efectos de la iluminación y de la reflexión en escenas reales son muy complicados y sutiles. La iluminación indirecta reviste especial dificultad. Es posible escribir ecuaciones que si-

DOS METODOS DE SIMULACION DE LUCES Y SOMBRAS





EL SEGUIMIENTO de rayos para la generación de imágenes de ordenador envía rayos luminosos ficticios desde el ojo del espectador hacia la escena que se está representando. El color y la intensidad de la luz en cada punto dependen de la reflectancia de las superficies interceptadas por el rayo a su paso a través de la escena.





EL ALGORITMO DE IRRADIANCIA calcula la intensidad de la luz en cada superficie de una escena en función de la intensidad de todas las demás superficies. Una vez resuelto el correspondiente sistema de ecuaciones, la escena puede ofrecerse rápidamente desde cualquier ángulo.

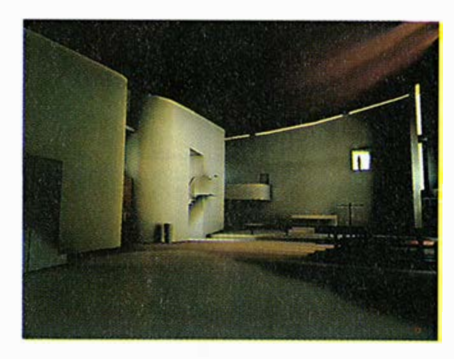
mulen con precisión esta iluminación global, pero exigen tiempos de proceso muy elevados.

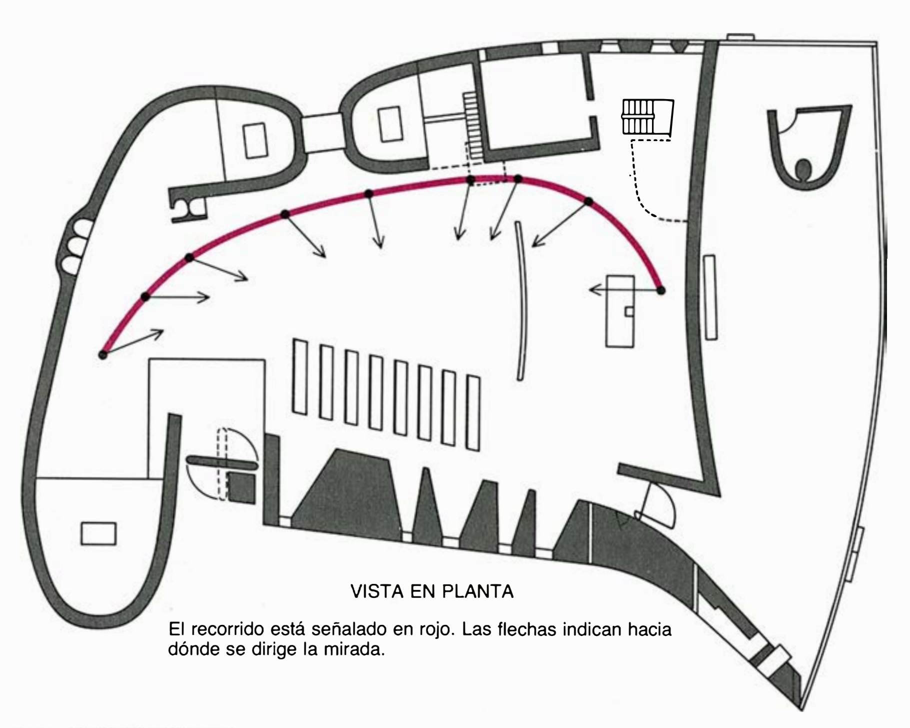
Entre los especialistas en grafismo informático dos son los métodos simplificados que han alcanzado mayor predicamento: el seguimiento de rayos y la irradiancia. Una y otra técnicas se valen, para la generación de imágenes, de métodos casi radicalmente opuestos. El seguimiento de rayos se ocupa de los rayos que llegan al ojo del observador, y resulta idónea para ambientes que contengan superficies de reflectancia elevada. La irradiancia determina la distribución de energía luminosa que hay de un extremo a otro de una escena; se adapta, sobre todo, a ambientes que contengan superficies mates.

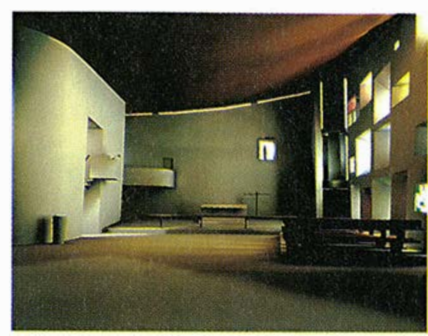
Aunque el seguimiento de rayos produce imágenes de realismo extraordinario, su utilidad para la evaluación de diseños es más bien reducida. El procedimiento depende del punto de vista, por lo que resulta necesario rehacer todo el cómputo cada vez que éste cambia. Los algoritmos basados en el seguimiento de rayos operan con demasiada lentitud como para generar secuencias dinámicas capaces de mostrar el aspecto que ofrece un espacio al atravesarlo.

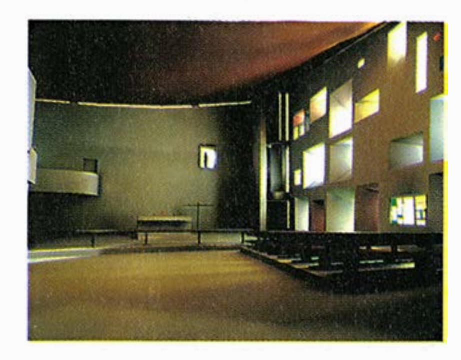
La técnica de irradiancia, desarrollada en Cornell en 1984, no depende del punto de vista; efectúa sus cálculos una sola vez para cada escena dada. Una vez determinada la iluminación global, resulta fácil crear una serie de imágenes desde diferentes puntos de vista. Más todavía: el algoritmo es capaz de crear imágenes

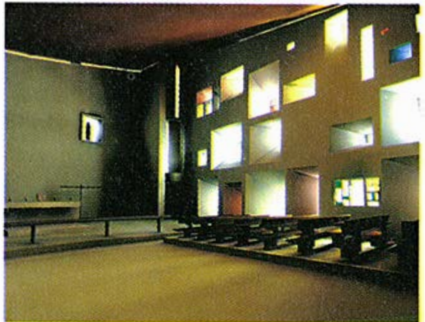
UN PASEO POR LA CAPILLA DE LE CORBOUSIER EN RONCHAMPS



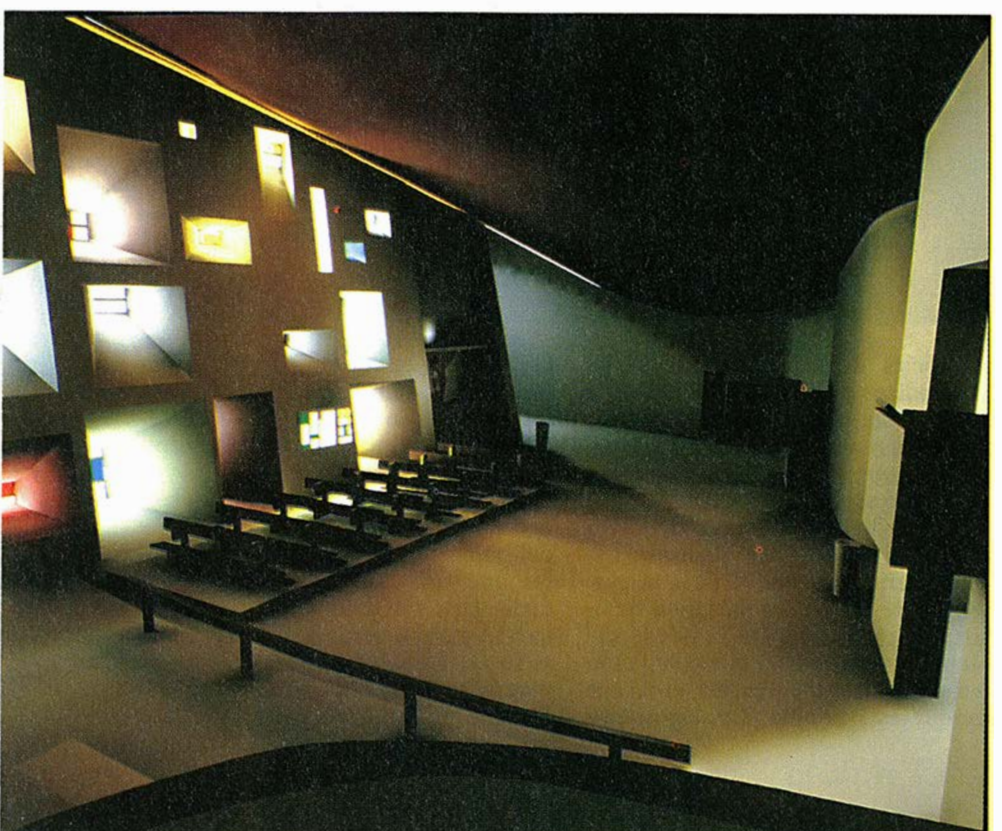














2. UN MODELO INFORMATICO proporciona la impresión de movimiento a través de un espacio. Programas de presentación, instalados en estaciones de trabajo gráfico de altas prestaciones, permiten la generación de vistas de una estructura a razón de varias por segundo, e incluso más. Tales paseos por el interior resultan útiles en la evaluación de estructuras por construir y en estudios de las estructuras ya existentes. Por ejemplo, la galería de Ronchamps (izquierda).

a la velocidad suficiente como para dar la impresión de movimiento.

El seguimiento de rayos consiste en proceder retrógradamente con las leyes habituales de propagación de la luz. En el mundo real, los rayos emanados de cada fuente luminosa de la escena se reflejan y dispersan desde las distintas superficies que componen la escena en cuestión; al cabo, una pequeña proporción de la totalidad de los rayos luminosos terminan penetrando en el ojo del observador. Los algoritmos de seguimiento de rayos, en cambio, recorren en sentido inverso las trayectorias de los rayos de luz desde el ojo, atravesando la escena hasta las superficies y las fuentes de luz que los engendraron.

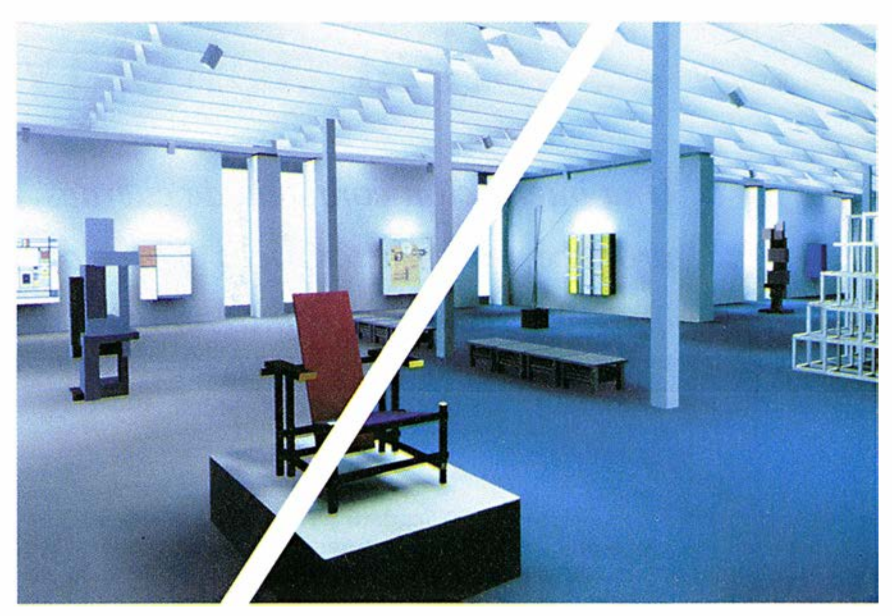
El método más popular de modelizado de la iluminación global mediante seguimiento de rayos fue introducido por Turner Whitted, en 1979. Va remontando el camino seguido por un rayo llegado al plano de imagen de la retina (a un píxel de la pantalla de una estación, por ejemplo) al atravesar el ambiente. Cuando el rayo hace impacto en una superficie, engendra rayos reflejados o refractados, que se siguen retrógradamente para establecer las superficies por ellos interceptadas. La intensidad final de cada punto se determina por la suma de la luz aportada por cada uno de los rayos engendrados.

La irradiancia se funda en la conservación de la energía para determinar con precisión la intensidad luminosa correspondiente a cada superficie de una escena compuesta por emisores y reflectantes ideales de luz difusa. Se puede escribir una ecuación definidora de la irradiancia de cada una de las superficies de una escena —la intensidad de la luz que abandona la superficie— en función de la irradiancia de todas las demás. La irradiancia de un objeto depende de dos factores: emisión (en el caso de que el objeto sea una fuente de luz) y reflexión de la luz incidente. La luz incidente, a su vez, depende de la emisión de luz de todas las fuentes del ambiente y de los reflejos de todas las demás superficies.

Los valores de irradiancia correspondientes a todas las superficies se expresan entonces como la matriz de un sistema de ecuaciones, que, resueltas, proporcionan los valores de iluminación correspondientes a cada porción de la escena.

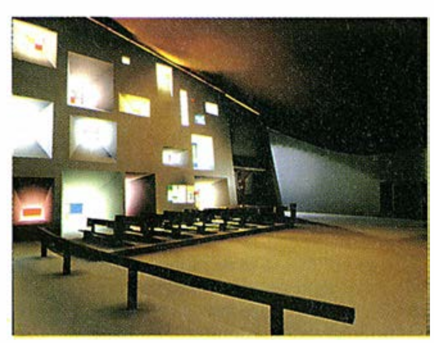
La irradiancia no sólo es rápida (una vez efectuados los cálculos iniciales), sino que constituye además un método muy preciso. Es capaz de reproducir fenómenos como el "sangrado de colores", en el cual los reflejos de una pared roja pueden hacer, por ejemplo, que una pared blanca vecina parezca rosada, amén de variaciones de penumbra en el interior de las sombras, o los bordes difuminados de las sombras proyectadas por fuentes extensas de luz como los paneles empotrados en el techo o las barras múltiples de luz fluorescente.

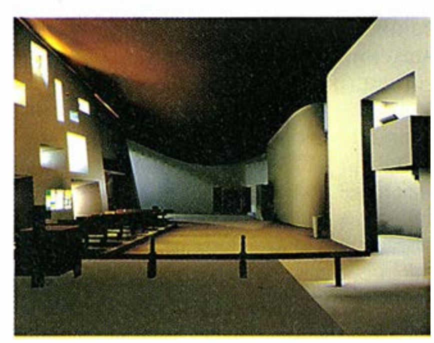
Los sistemas de diseño asistido por ordenador permiten ya producir los tipos de imágenes que los arquitectos necesitan. La cuestión pendiente más importante es la creación de programas que faciliten la ideación de sus modelos. Los investigadores están apenas empezando a tomarle la medida a las clases de operaciones necesarias para diseñar un edificio —creación de formas, especificación de calidades de las superficies, conjunción de objetos para formar con ellos compuestos sin costuras. Aunque es muy posible que los primeros esbozos burdos de un proyecto se realicen siempre en papel, el decenio venidero verá programas sencillos de aprender y utilizar, mas con potencia suficiente para habérselas con el diseño de edificios enteros.



3. COLOR Y TEXTURA de las presentaciones informáticas; este hipotético museo de arte moderno constructivista y otras creaciones similares pueden modificarse rápida y sencillamente. Los arquitectos y sus clientes pueden evaluar a costo mínimo distintas posibilidades de materiales de construcción.







BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

PRINCIPLES OF INTERACTIVE COMPUTER GRAPHICS. Segunda edición. William M. Newman y Robert F. Sproull. McGraw-Hill, 1979.

FUNDAMENTALS OF INTERACTIVE COMPUTER GRAPHICS. James D. Foley y Andries Van Dam. Addison, 1982.

La acústica del clavicémbalo

Una interacción compleja de cuerdas, madera y aire produce las características vibraciones que el oído humano reconoce como timbre del clavicémbalo

Edward L. Kottick, Kenneth D. Marshall y Thomas J. Hendrickson

Los aficionados a la música de fines del siglo XVIII pueden discutir sobre las excelencias de tres cordófonos de teclado que tuvieron gran difusión en la época. El piano, cuyas cuerdas entran en vibración gracias a los potentes golpes de sus martillos, se ha convertido en el instrumento más popular. Permite crescendos de gran fuerza y diminuendos suaves. El clavicordio, de sonido más apagado, funcionaba por la percusión de las cuerdas con láminas de bronce, permitiendo crescendos y diminuendos sólo en el ámbito inferior de la escala de intensidades. Era pequeño y de construcción relativamente barata. El clavicémbalo (también llamado clave, clavecín, cémbalo o clavicímbano) era el único miembro del grupo con las cuerdas pinzadas. Incapaz de producir variaciones de intensidades suaves y fuertes, poco a poco perdió el favor de la sociedad europea, y cuando se construyó el último en 1809, parecía quedar por siempre relegado a las salas de los museos.

Ochenta años después, los músicos se dieron cuenta de que este instrumento no tenía parangón por su timbre tan característico. El instrumento tenía una superioridad en la ejecución de la música del barroco y de la música más antigua que el piano no podía alcanzar. En 1889 se volvieron a fabricar clavicémbalos, y gracias a su resurrección, la música para teclado de Bach, Purcell, Rameau, Couperin, Scarlatti y Haendel se vuelve a oír en el instrumento original para el que fue compuesta. Mas, a pesar de sus cinco siglos de existencia, hasta hace poco se desconocía mal cómo generaba su sonido tan resonante.

Al igual que el piano, dispone de una caja y una tapa armónica de resonancia cruzada por cuerdas; lo mismo que el violín y la guitarra, consta de una tapa armónica, unos laterales y un fondo que encierran un volumen de aire. Pero las semejanzas resultan ilusorias. El piano moderno dispone de una tapa armónica gruesa y unos laterales macizos; carece de fondo y, por tanto, no encierra un volumen de aire. El violín y la guitarra poseen forma simétrica. El clavicémbalo no la tiene, y su puente es muy largo comparado con el del violín. Se puede afirmar que el clavicémbalo posee una construcción y una acústica poco comunes.

Los fabricantes de clavicémbalos desarrollaron dos tipos básicos de construcción. Los seguidores del estilo meridional, básicamente en Italia, construyeron instrumentos con cuerdas cortas; la longitud de la cuerda que da el *do*, una octava por encima del *do* central, tiene entre 25 y 28 cm. Con cierta calidad explosiva en el punteado, el timbre es diáfano, penetrante y resonante. Los constructores flamencos concibieron un instrumento más voluminoso y menos frágil, con cuerdas más largas, de unos 36 cm. El sonido de los clavicémbalos de estilo nórdico era nasal y aterciopelado, muy distinto del que caracterizaba a los italianos.

Con el propósito de intentar comprender los misterios acústicos del clavicémbalo, uno de nosotros (Kottick) y el físico William R. Savage, ya fallecido, establecimos en 1976 un laboratorio de acústica en la Universidad de Iowa. Con la ayuda de otros investigadores, estudiamos la física del instrumento, recabando mucha información a partir de un clavicémbalo de estilo flamenco que construimos nosotros mismos. Investigamos los instrumentos antiguos del Museo de Arte Metropolitano de Nueva York, de la colección de la Universidad de Yale, del Instituto Smithsoniano y del Museo de Bellas Artes de Boston. Estudiamos, además, instrumentos modernos construidos por Zuckermann Harpsichords. En total, investigamos 39 instrumentos.

Los clavicémbalos se diseñaron fundamentalmente para transformar energía mecánica en ondas de presión que se trasmiten al oído a través del aire. Un músico da la energía mecánica al teclado, que consta de palancas de madera que oscilan sobre puntas que sobresalen de una guía.

En el extremo de cada palanca de las teclas hay uno o más martinetes. Los martinetes suben y bajan a través de unas guías de madera. Cada martinete consta de un cuerpo, una lengüeta, que pivota en el martinete, un resorte para que la lengüeta vuelva a su posición de reposo, un plectro y un apagador de fieltro.

Al apretar una tecla, se levanta un martinete que, a su vez, aprieta el plectro contra la cuerda correspondiente. La acción de elevación del plectro pellizca la cuerda. A continuación, con un poco más de presión, la cuerda se desliza apartándose del plectro. Este pellizco se propaga a lo largo de la cuerda chocando con la punta del puente. Aquí, el pellizco transfiere parte de su energía al puente, que, a su vez, transmite la energía a la tapa armónica, fina y flexible. El pellizco se refleja hacia la clavija. Por hallarse la clavija sobre una tabla gruesa de madera que es muy estable,

EDWARD KOTTICK, KENNETH MARSHALL y THOMAS HENDRICKSON se han consagrado al estudio de la acústica musical. Kottick, profesor de musicología de la Universidad de Iowa, construye clavicémbalos. Marshall, que trabaja en una empresa de cauchos, se interesó por la física musical en 1982. Hendrickson es profesor emérito en la Universidad de Gettysburg. Los autores dedican el artículo a la memoria de William R. Savage.

1. CLAVICEMBALO de estilo italiano, restaurado en el siglo XIX con elementos del XVII. La tapa ilustra un cuadro bucólico; cupidos y guirnaldas decoran los laterales. Los instrumentos de estilo flamenco solían recargar más los adornos.

se disipa allí muy poca energía de la generada por el pellizco.

Por tanto, el pellizco se refleja entre la clavija y el puente. En cada paso, el pellizco transfiere cierta cantidad de energía al puente. La cuerda llega a su estado de reposo habiendo transferido su energía a la tapa armónica, y, en menor proporción, al aire que rodea la cuerda. (Con varios martinetes para cada tecla, se logra mayor variedad tímbrica.)

La velocidad a la que viaja el pellizco depende de la masa por unidad de longitud y de la tensión de la cuerda. La combinación de la velocidad del pellizco con la distancia que recorre —es decir, la longitud de la cuerda— define el valor de la vibración. Por tanto, un pellizco que hace 440 recorridos de ida y vuelta en un segundo produce un *la* por encima del *do* central. Este es el valor "*la* = 440 ciclos" conocido por todos los músicos y representa el tono fundamental de aquella cuerda. Otras cuerdas están afinadas a notas diferentes.

En realidad, la cuerda del clavicémbalo vibra de una manera más compleja. Mientras oscila a 440 ciclos, la cuerda también vibra por mitades, en las cercanías de los 880 ciclos. Simultáneamente la cuerda vibra en tercios, a unos 1320 ciclos; en cuartos, a unos 1760 ciclos, y así sucesivamente. Los modos vibratorios reciben el nombre de parciales o sobretonos.

Las cuerdas quisieran oscilar lo más cerca posible de los parciales armónicos, es decir, múltiplos enteros del fundamental. En la práctica, los parciales no se producen siguiendo proporciones tan simples, ya que las cuerdas tienen un grosor y una longitud, lo que causa una "enarmonía", o imposibilidad de vibrar armónicamente. La enarmonía es parte de la calidad tímbrica del clavicémbalo. Sin ella, el timbre característico del instrumento se consideraría blando.

Debido a que la cuerda vibra en otros modos, además del fundamental, el puente debe absorber la energía de todos los parciales, amén de la energía del fundamental. Sin embargo, el puente tiende a ser discriminante. Gobierna la fuerza de las excitaciones producidas por ciertos parciales e impide que otros accedan a la tapa armónica. También regula el caudal de energía que se transfiere de la cuerda a la tapa armónica.

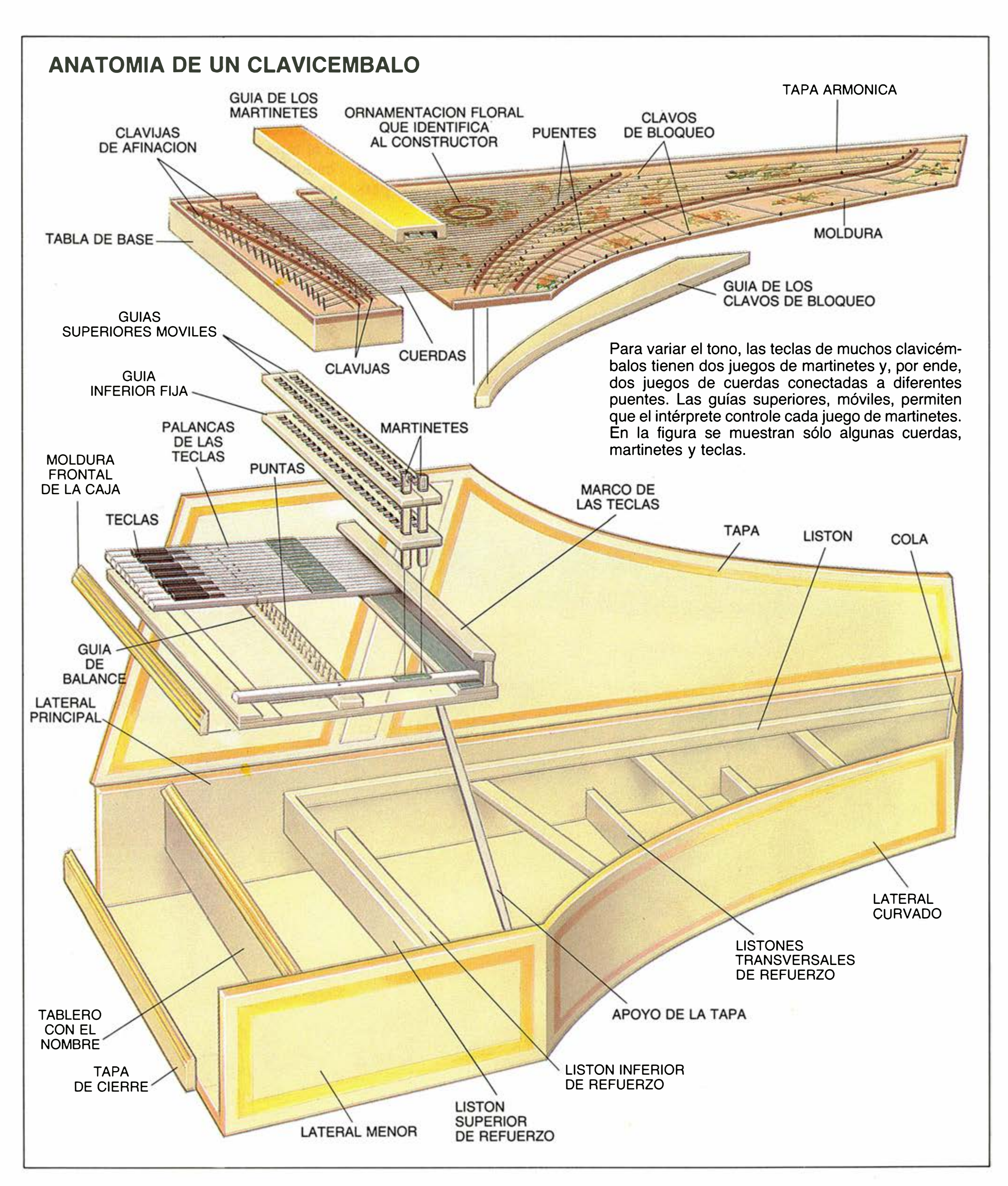


El rendimiento con el que el puente se desenvuelve en estas operaciones depende del llamado acoplamiento de impedancias entre las cuerdas y la tapa armónica. Un balance perfecto de impedancias, sin obstrucciones ni reflexiones del puente, permitiría que toda la energía de la cuerda vibrante se transfiriera inmediatamente a la tapa armónica. El resultado sería un golpe fuerte y no muy musical. Un acoplamiento de impedancia pobre tendría el efecto opuesto. Requeriría mucho tiempo para que se disipara la energía de la cuerda vibrante, pero habría poca emisión de sonido.

La tapa armónica, una placa fina de abeto de un grosor de 3 mm, tiene una forma triangular, con las vetas longitudinales. Este es uno de los elementos más misteriosos del clavicémbalo. El rendimiento de la tapa armónica depende de su forma, grosor, distribución de la masa y configuración de las vetas, así como de las características del puente y de los diferentes listones y elementos pegados en su parte inferior.

Sujeta de forma rígida a la caja, la tapa armónica está pegada a unos listones que rodean el lateral principal, la cola, el lateral curvado y el lateral menor. La parte delantera de la tapa

ANATOMIA DE UN CLAVICEMBALO



Para variar el tono, las teclas de muchos clavicémbalos tienen dos juegos de martinetes y, por ende, dos juegos de cuerdas conectadas a diferentes puentes. Las guías superiores, móviles, permiten que el intérprete controle cada juego de martinetes. En la figura se muestran sólo algunas cuerdas, martinetes y teclas.

armónica se halla unida a la parte superior del listón transversal de refuerzo, un elemento estructural que hace las veces de pared más alejada de la abertura y va desde el lateral principal hasta el lateral menor. Al igual que un altavoz, la tapa armónica puede vibrar a todas las frecuencias significativas. Pero tiene también modos normales de vibración, que se producen a frecuencias definidas. A estas frecuencias, la tapa armónica resuena con mayor amplitud que a otras frecuencias y, por tanto, impone sus características sobre la energía cedida por la cuerda vibrante.

Uno de nuestros primeros intentos para comprender el comportamiento de la tapa armónica fue el estudio de las curvas de respuesta de frecuencia y las configuraciones de los modos propios de un cierto número de clavicémbalos. Tal análisis identifica las frecuencias a las que se producirán las resonancias. El timbre de un clavicémbalo, así como el de otros instrumentos, depende bastante de cómo fundamentales y parciales de las cuerdas exciten las resonancias.

Para generar las curvas de respuesta de la tapa armónica, utilizamos un generador de señales que desarrolla una frecuencia sinusoidal —un tono puro— en la punta metálica de cada cuerda. Un sonómetro (medidor del nivel de presión del sonido) medía la respuesta del clave con respecto al estímulo sinusoidal. De esta manera, obtuvimos curvas de respuesta para los fundamentales de cada nota.

Aunque las curvas sólo medían de forma basta las características de cada instrumento, nos facultaba para extraer algunas conclusiones provisionales sobre las propiedades de los clavicémbalos. Primero, las tapas armónicas tienen muchas resonancias, todas muy amplias. Segundo, los picos importantes de resonancia identifican el tipo de clavicémbalo. Los clavicémbalos flamencos tienen de 3 a 7 picos prominentes, todos ellos situados debajo de los 400 ciclos. Por su parte, los clavicémbalos italianos poseen sólo 3 picos de resonancia, generalmente entre 100 y 200 ciclos.

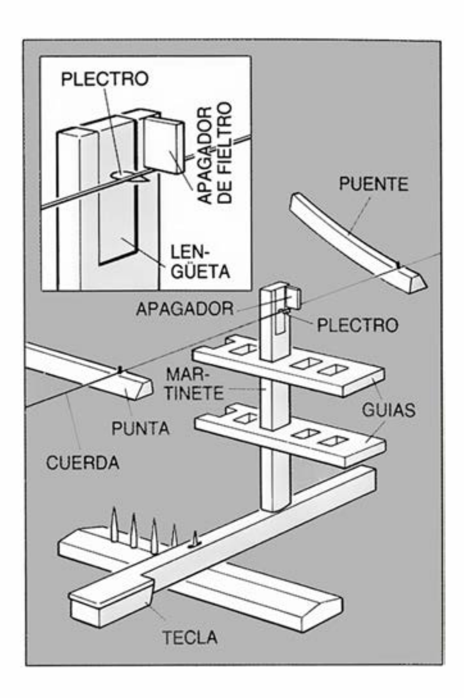
Para estudiar visualmente las resonancias, desparramamos purpurina sobre la superficie de la tapa armónica. Este método de análisis, que recibe el nombre del físico alemán Ernst F. F. Chladni, proporciona un método gráfico para identificar las configuraciones vibratorias de las placas y de las membranas, e identifica los modos propios. Cuando la tapa armónica vibra a una de sus frecuencias de resonancia, la purpurina se desplaza de las regiones que se mueven y se acumula a lo largo de las líneas nodales, o áreas donde la tapa armónica no vibra. La purpurina rodea las zonas de máximo movimiento, creando "zonas calientes" de forma elíptica.

En contra de todo sentido común, las zonas de la tapa armónica que vibraron con la mayor amplitud estaban alejadas de la zona que se hallaba directamente debajo de la punta metálica del puente sobre la que se actúa. Esta observación demuestra la importancia del adecuado acoplamiento de impedancias entre las cuerdas y la tapa armónica. Si el área donde la cuerda cruza el puente se mueve mucho, la energía de la cuerda vibrante se transferirá con demasiada facilidad, generando un sonido indeseable desde el punto de vista musical.

La forma generalmente elíptica de los puntos calientes se debe a la configuración de las vetas del abeto. La velocidad del sonido por el curso de las vetas cuadruplica su celeridad en el sentido transversal. Sin embargo, la elipse no es perfecta debido a los listones y a los puentes. En los clavicémbalos flamencos, la orientación de la configuración va desde la parte delantera hacia la parte trasera de la tapa armónica —es decir, sigue la misma orientación que los puentes, la guía de los clavos de bloqueo y la barra terminal. Las tapas armónicas italianas están generalmente fijas casi en ángulo recto con respecto al lateral principal. Esta situación hace que se compense la velocidad del sonido que va en distintas direcciones; las configuraciones Chladni de los clavicémbalos italianos tienden a ser más circulares que la de los flamencos.

Por último, las configuraciones daban a entender que cualquier punto de la tapa armónica se mueve en una magnitud suficientemente grande a una o más frecuencias. Toda la tapa armónica, en uno u otro momento, participa en alguno de los modos. Al igual que las curvas de respuesta, las configuraciones Chladni pusieron de relieve las características generales de los clavicémbalos. Pero ni dejaban al descubierto los detalles más íntimos ni revelaban qué sucedía en otros puntos fuera de la tapa armónica.

Obtuvimos una mayor información sobre el comportamiento físico de nuestro clavicémbalo de laboratorio echando mano del análisis modal. Este útil matemático permite describir la respuesta dinámica de una estructura mediante sus propiedades modales: su frecuencia de resonancia, las características de amortiguación y los movimientos relativos en distintos puntos. Situamos dos acelerómetros —pequeñas unidades electrónicas que transforman el movimiento físico en señales eléctricas— en la parte inferior de la tapa armónica. Para excitar los modos vibratorios, golpeamos en distintos puntos del clavicémbalo con un martillo. Percutimos en 605 puntos; de éstos, más de trescientos estaban en la propia tapa armónica. Un ordenador registró los datos de las señales y calculó los modos propios *(eigenmodos)*.

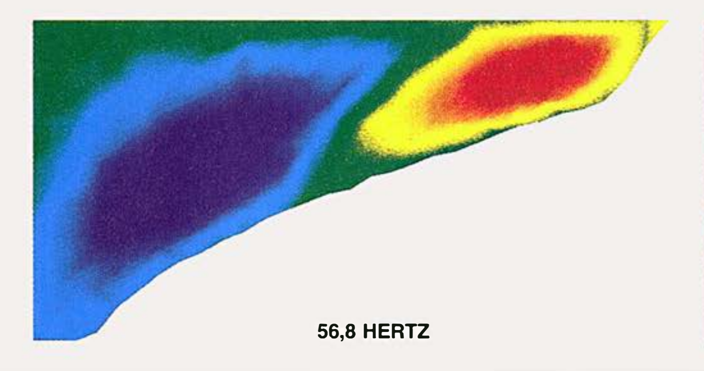


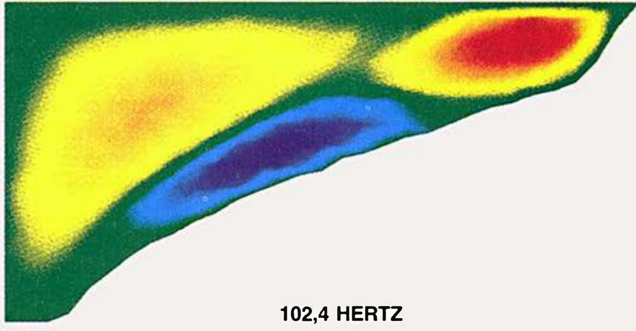
2. MARTINETE DE UN CLAVICEMBALO y las dos guías que atraviesa. Su plectro pellizca una cuerda (*recuadro*), y la vibración se transmite a la tapa armónica a través del puente.

Los mapas modales generados por el ordenador confirmaron las configuraciones Chladni. El análisis modal puso de manifiesto otros detalles, que revelaron que la caja del clavicémbalo tenía una parte activa en el movimiento vibratorio. De hecho, a ciertas frecuencias bajas, la amplitud del movimiento de la caja rivalizaba con la de la tapa armónica. Un vídeo tridimensional, generado por ordenador, de los modos propios mostró la caja se elevaba en la zona del atril; a veces, parecía una placa alabeada a lo largo del eje longitudinal. Tampoco permanecían estacionarios el teclado, la maciza tabla de base y la tapa del instrumento; bailaban al son de sus familias de modos propios.

Al sonido emitido por el clavicémbalo contribuye sólo una fracción de esta actividad vibratoria. La mayor parte del movimiento determina la "calidad" del instrumento. Un buen ejemplar, que además de un buen sonido tiene "facilidad de manejo", parece ser el resultado de este tipo de vibraciones no musicales.

El mapa modal de la tapa armónica





3. MODOS NORMALES DE VIBRACION o *eigenmodos* (modos propios) de una tapa armónica se representan en colores arbitrarios mediante el análisis modal. Las imágenes presentan los movimientos: elevación con fuerza (*rojo*), elevación débil (*amarillo*), ligera depresión (*azul pálido*) y

resultó ser muy complejo a frecuencias de resonancia cada vez más altas: el tamaño de los puntos calientes se reduce y su número crece. Las zonas de la tapa armónica a cada lado de los puentes poseen espesores bastante uniformes; en cierta manera, parecen membranas largas y delgadas. Aquí se observa una serie de puntos calientes que se desenvuelven y crecen en sentido longitudinal.

Entre esta abundante y casi incomprensible actividad se esconde una información importante. Entre cero y 600 ciclos, descubrimos 36 modos distintos. Lo que representa un modo vibratorio cada 16,8 ciclos, una actividad de gran densidad. Esta densidad aumenta la posibilidad de que un parcial de una cuerda excite un modo.

No es la madera lo único que se mueve en un clavicémbalo. Como el instrumento tiene un fondo, el conjunto forma una caja que encierra un volumen de aire. Cuando la tapa armónica se mueve, este aire vibra. Y al igual que la tapa armónica, el aire también tiene sus modos preferenciales. De forma simplificada, las cavidades de aire se pueden considerar una suerte de espacio en cuña, limitado en los laterales y en el fondo por maderas bastante rígidas, y cerrado por arriba por una tapa flexible. Sin embargo, este recinto tiene una ventana, el espacio entre los listones de refuerzo, justo detrás del conjunto formado por las teclas, los martinetes y el soporte del teclado, que permite el paso de cierta cantidad de aire.

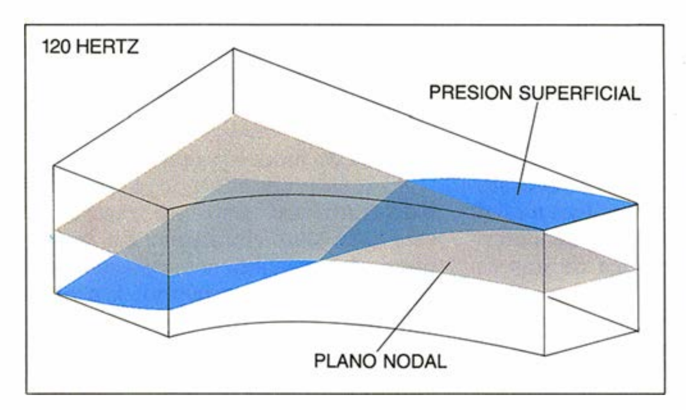
La ecuación de ondas predice la existencia de tres familias de modos propios que pueden compartir la cavidad de aire del clavicémbalo. La primera presenta ondas estacionarias en sentido vertical, de suelo a techo. Estos modos se inician a altas frecuencias, hacia 945 ciclos; vuelven a aparecer a intervalos armónicos.

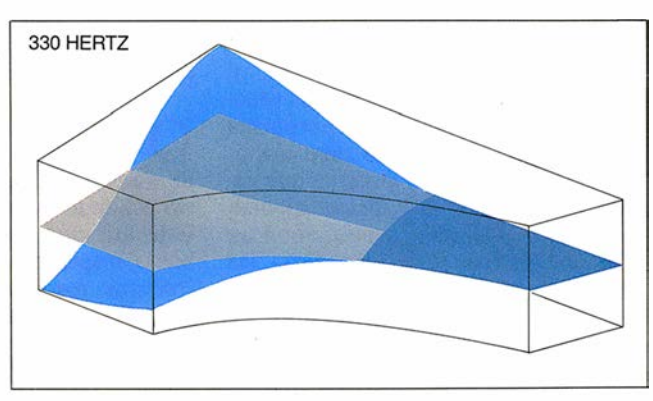
Se obtienen las otras dos familias de modos de la cavidad de aire mediante las soluciones matemáticas de la ecuación de onda. Estas soluciones indican que una familia produce ondas que se distribuyen a partir de la cola del clavicémbalo. Las ondas se reflejan cuando llegan a la zona del listón de refuerzo, creando ondas estacionarias en la cavidad. Las frecuencias de esta familia empiezan con valores bajos. Los modos propios aparecen a intervalos regulares (pero no armónicos) por encima de la frecuencia inicial.

La tercera familia tiene una superficie nodal que pasa por el centro de la cavidad de aire. Las crestas y los valles también existen, pero se producen a pares a cada lado de la superficie nodal, con una cresta siempre frente a un valle.

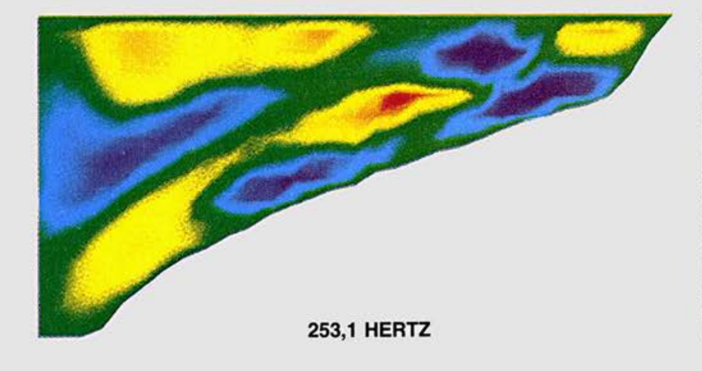
Si bien esas soluciones revelaron qué modos existían en la cavidad de aire, fue preciso que los modos normales se midieran para determinar su amplitud. Proyectamos sonido en la cavidad con un generador acústico (un altavoz). Seis micrófonos situados en la cavidad detectaban las resonancias acústicas resultantes.

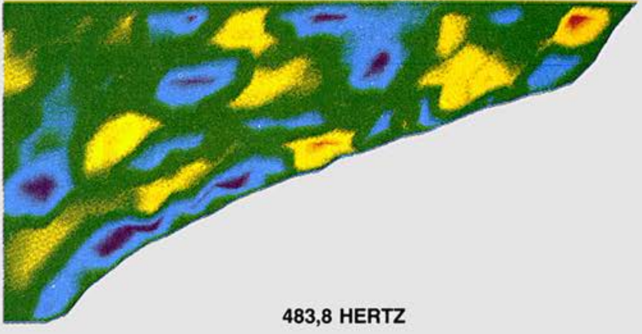
Esta información señaló que los modos propios con mayor amplitud eran los que se reflejaban con mayor fuerza en la separación entre los listones de refuerzo. Se producía una pequeña fuga a bajas frecuencias, especialmente en el primer modo propio, pero los modos dominantes eran similares al que se genera en un tubo cerrado por ambos extremos. Esta información da a entender que los modos de la cavidad de aire no pueden contribuir directamente al sonido emitido por el clavicémbalo. Ello no quiere decir que los modos del aire carezcan de importancia; la presencia del aire afecta al comportamiento de la tapa armónica.





4. LOS MODOS DE LA CAVIDAD DE AIRE de un clavicémbalo para 120 y 330 ciclos, resultantes del movimiento de la tapa armónica. Si bien el aire no contribuye directamente al sonido, influye sobre la tapa armónica actuando de carga o a modo de muelle interno. (Dibujos de Hank Iken.)





fuertemente deprimido (*azul*). Las zonas donde la tapa armónica no se mueve se denominan nodos (*verde*). Se detectaron un total de 36 modos propios entre 0 y 600 ciclos (el *sol* más grave tiene 50 ciclos y el *la* por encima del *do* central tiene 440 ciclos). Ilustración: Kenneth D. Marshall.

Las cuerdas no se comunican directamente con la cavidad de aire; sólo el movimiento de la tapa armónica puede excitar un modo del aire encerrado. Pero el aire encerrado puede afectar indirectamente este proceso, influyendo sobre el movimiento de la tapa armónica. La tapa armónica puede excitar un modo del aire en ausencia de una resonancia propia si la tapa se mueve con amplitud suficiente para excitar el punto caliente del modo del aire.

Los modos del aire encerrado también pueden tener su influencia en la tapa armónica comportándose como una carga o actuando como un muelle interno. Además, puede producirse un acoplamiento físico si las formas del modo de la tapa armónica y del aire encerrado son semejantes y si sus frecuencias son muy próximas. El aire encerrado y la tapa armónica actúan conjuntamente suprimiendo algunas frecuencias y resaltando otras.

Debiera ser posible contestar ya la pregunta de cómo el clavicémbalo produce su timbre tan peculiar. Un músico pulsa una tecla y hace que una cuerda entre en vibración, con una pauta compleja que consiste en un fundamental y muchos parciales. La cuerda mueve unas pocas moléculas de aire —seguramente incapaces de crear ondas de presión de amplitud suficiente para que pueda percibirlas el oído. Los sonidos percibidos de un clavicémbalo no proceden directamente de las cuerdas vibrantes. Son las cuerdas las que transmiten su energía a la tapa armónica a través del puente. Este actúa a modo de filtro selectivo, permitiendo que sólo algunas frecuencias de la cuerda vibrante pasen a la tapa armónica. La tapa armónica impone sus propias características a las frecuencias que recibe, suprimiendo unas y resaltando otras. El aire de la cavidad y los elementos estructurales también condicionan el sonido, estableciendo una interacción con la tapa armónica.

Pero quizá lo determinante en el timbre de un clavicémbalo sean los muchos modos propios que encontramos en los ensayos de análisis modal. La alta densidad modal de la tapa armónica asegura que un gran porcentaje de los parciales de las cuerdas excitarán un modo de la tapa armónica, un modo del aire encerrado o de ambos simultáneamente.

Por ejemplo, cuando se pulsa el *la* más grave de un clavicémbalo, una nota con una frecuencia fundamental de 55 ciclos, se excitan las resonancias de la tapa armónica con los tres primeros parciales de la cuerda; con el parcial noveno se excita un modo del aire encerrado, y con los parciales cuarto, quinto, sexto y octavo se excitan simultáneamente modos del aire encerrado y de la tapa armónica. Es decir, de los diez primeros parciales de la cuerda de este *la* grave, sólo el séptimo y el décimo parciales no excitan una resonancia. El sonido rico y uniforme emitido por un clavicémbalo es resultado directo del gran número de resonancias del aire encerrado y de la tapa armónica que los parciales de la cuerda han excitado.

Existe otra fuente de coloración que da al clavicémbalo su timbre: el oído humano. Una de las características del clavicémbalo es su potente grave. Pero el fundamental de la cuerda grave no es muy potente. Si lo fuera, la cuerda vibraría con una gran amplitud, golpeando la tapa armónica y las otras cuerdas. ¿Cómo percibe el oído un grave tan característico y tan potente?

La respuesta está en un fenómeno psicofisiológico llamado heterodinia. Las cuerdas graves tienen una estructura rica en parciales potentes. (Las cuerdas agudas parecen oscilar con menos parciales que las graves, porque la mayoría de sus parciales de alta frecuencia quedan fuera de la percepción del oído.) El cerebro identifica estos parciales como las notas graves del clavicémbalo y aporta las frecuencias que faltan o que son débiles.

Tomemos por ejemplo el *sol* grave del clavicémbalo, con una frecuencia de unos 50 ciclos. Si bien el fundamental está físicamente presente en la cuerda vibrante, es un componente débil de la serie de frecuencias que llegan al oído. Sin embargo, el cerebro identifica los parciales cercanos a las frecuencias de 100, 150, 200, 250, etc., ciclos, que pertenecen a la serie de frecuencias muy relacionadas entre sí que forman la nota *sol* grave. No tiene problemas para añadir una frecuencia propia de 50 ciclos. El fenómeno de heterodinia es el mismo proceso mediante el cual uno puede reconocer un amigo con la voz grave a través del teléfono, un aparato cuyo altavoz es demasiado pequeño para poder vibrar con fuerza a las frecuencias más graves de una voz.

El oído da un tipo más de coloración. El mecanismo de audición "oye" muy bien las notas agudas, pero es bastante ineficaz en el registro grave. Para compensar este hecho, los instrumentos musicales utilizan más energía en la generación de sonidos graves que en la de los agudos, lo que redunda en la uniformidad de la percepción sonora.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

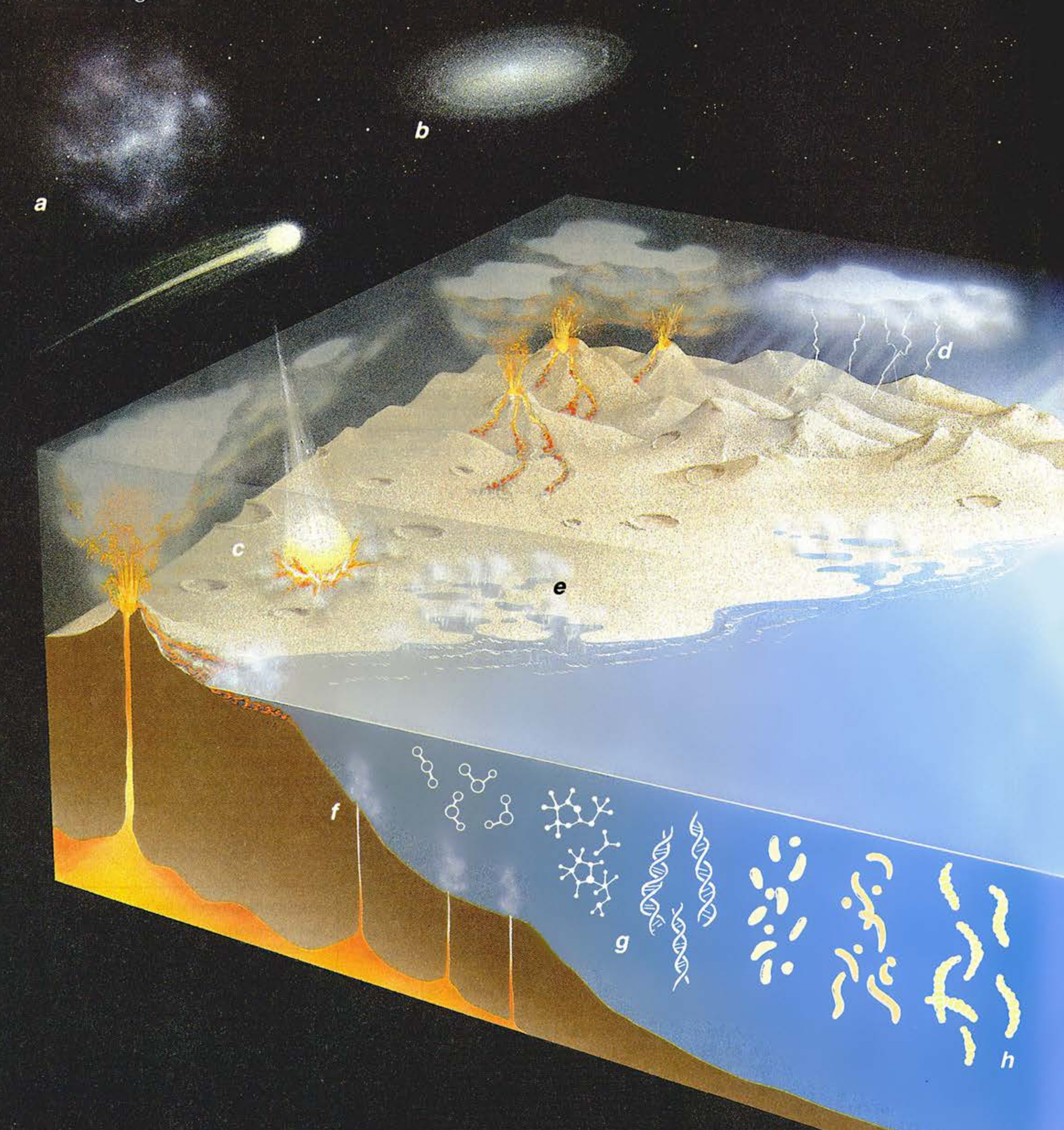
THE ACOUSTICS OF THE HARPSICHORD: RESPONSE CURVES AND MODES OF VIBRATION. Edward L. Kottick en *The Galpin Society Journal*, vol. 37, págs. 55-77; 1985.

THE HARPSICHORD OWNER'S GUIDE: A MANUAL FOR BUYERS AND OWNERS. Edward L. Kottick, University of North Carolina Press, 1987.

ACOUSTICAL ANALYSIS OF A HARPSICHORD. W. R. Savage, E. L. Kottick, T. J. Hendrickson y K. D. Marshall en *Journal of the Acoustical Society of America* (en prensa).

EN EL PRINCIPIO...

John Horgan





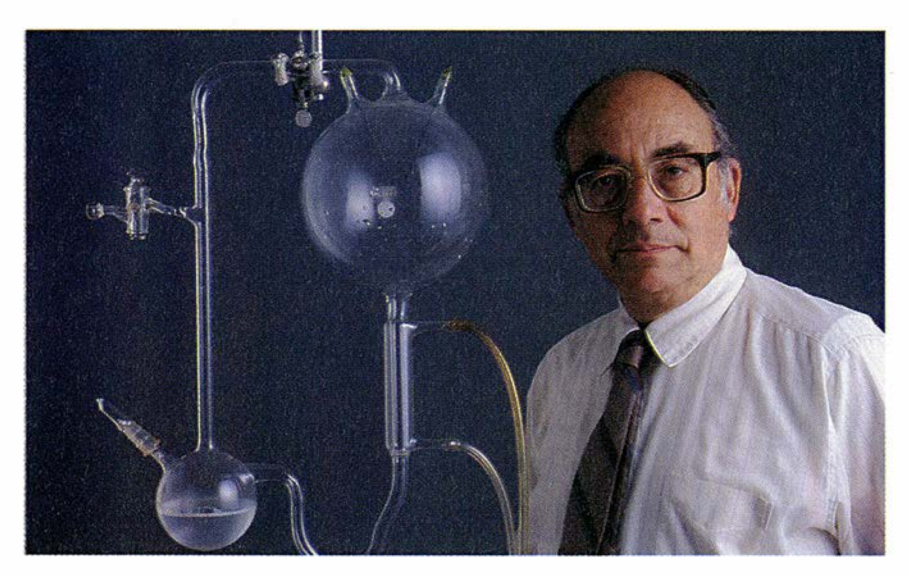
Hay puntos de vista muy dispares sobre cuándo, dónde y, sobre todo, cómo empezó la vida sobre la Tierra.

Hace ahora treinta y ocho años que el mayor misterio al que se han enfrentado jamás los científicos —el origen de la vida— parecía haber quedado resuelto con un único y sencillo experimento. Stanley Miller, un joven de 23 años que preparaba su doctorado en la Universidad de Chicago, recreó la tierra primitiva en un pequeño alambique sellado. Lo llenó con unos litros de metano, amonio e hidrógeno (la atmósfera) y un poco de agua (los océanos). Con un dispositivo de descargas simuló una tormenta eléctrica, de rayos, que fulminaban los gases; con una resistencia, hizo borbotear el agua.

A los pocos días, el agua y el cristal aparecían teñidos de una sustancia rojiza. Tras analizarla, comprobó, con regocijo, que tal sustancia era rica en aminoácidos, los compuestos orgánicos que se enlazaban para formar las proteínas, la base material de la vida. Los resultados de Miller, publicados en un modesto artículo de dos páginas en la revista *Science*, parecían apoyar la idea de que la vida podría haber surgido a partir de unas sencillas reacciones químicas en la "sopa primordial".

Los entendidos no tardaron en pronosticar que los científicos, igual que el Dr. Frankenstein de Mary Shelley, pronto crearían organismos vivos en sus laboratorios, y se podría desentrañar el origen de la vida con todo lujo de detalle. La realidad ha sido muy otra. "El problema del origen de la vida ha resultado más complicado de lo que yo y muchos suponíamos", reconoce el propio Miller, que enseña ahora química en la Universidad de California en San Diego.

VERSION CIENTIFICA DEL GENESIS. Arranca con la condensación del sistema solar, a partir de una nube de polvo y gas, hace unos 4500 millones de años (a, b). *Los compuestos químicos orgánicos podrían haber sido aportados por los impactos* (c) *o bien sintetizados en la atmósfera* (d), *masas de agua* (e) *o surgencias hidrotermales submarinas* (f). *Esos compuestos químicos se combinaron y formaron sustancias orgánicas más complejas, como las proteínas y ácidos nucleicos* (g). *Los impactos y un sofocante efecto de invernadero, causado por el dióxido de carbono emitido por los volcanes, podrían haber inutilizado la superficie terrestre hasta hace unos 3800 millones de años. Hace 3500 millones de años, 300 millones arriba o abajo, surgieron unos microbios fotosintéticos, parecidos a las cianobacterias, o algas azul verdosas* (h). *Estos primitivos organismos se concentraban a veces en densas formaciones, o estromatolitos, en las orillas de mares someros* (i).



1. STANLEY L. MILLER ante una réplica del aparato que utilizó en su experimento de 1953, realizado en la Universidad de Chicago, con el que demostró cómo se pudieron formar los aminoácidos.

Cabe decir, sin embargo, que algunos progresos se han producido desde 1953. Ese mismo año, por ejemplo, James D. Watson y Francis H. C. Crick descifraron la estructura del ADN (ácido desoxirribonucleico), la hélice bicatenaria que contiene la información que las células necesitan para construir y organizar las proteínas.

En las décadas siguientes, experimentos similares a los de Miller demostraron las posibles vías de síntesis de los componentes primarios del ADN (los nucleótidos) y de las proteínas (aminoácidos), en condiciones prebióticas. Esos compuestos orgánicos podrían haberse acumulado en determinadas masas de agua: "pequeñas charcas templadas", como propuso Charles Darwin, en remansos de marea o en mares someros.

Nuevos experimentos, realizados a principio de los ochenta, ayudaron a completar el panorama. Revelaban que el ácido ribonucleico, o ARN, una molécula monocatenaria que actúa de intermediario del ADN en la fabricación de las proteínas, podía autocopiarse sin el concurso de enzimas. Para algunos, los primeros organismos contenían ARN; habría existido un "mundo de ARN" precoz, que sirvió de puente entre la química sencilla y los prototipos de células complejas, basadas en el ADN, como las que poseen los organismos modernos. De acuerdo con el registro fósil, tales células surgieron a lo largo de los primeros mil millones de años transcurridos desde la formación de la Tierra; y esto último ocurrió hace cuatro mil quinientos millones de años.

A pesar de que ese marco teórico figura ya en los libros de texto, ha sido seriamente cuestionado. Los experimentos realizados para comprobar la hipótesis del mundo de ARN han demostrado la dificultad de sintetizar ese ácido nucleico en las condiciones que probablemente prevalecieron durante el origen de la vida, y que las moléculas no pueden autocopiarse con tanta facilidad.

Para complicar las cosas, los descubrimientos recientes sugieren que la vida surgió en un ambiente bastante menos favorable que el del alambique de Miller. La atmósfera primordial pudo no contener metano ni amonio, como Miller suponía, y, por tanto, no habría sido tan favorable para la síntesis de compuestos orgánicos, según se desprendía de su experimento. Además, los estudios de los cráteres lunares indican que la Tierra estuvo sometida a un bombardeo incesante por enormes cometas y meteoritos. "Da la impresión de que la vida no se originó en una charca templada y tranquila, sino en el centro de una fuerte tempestad", asegura Christopher P. McKay, del Centro Ames de Investigaciones de la NASA en California.

A medida que el viejo paradigma se tambaleaba, surgían otras teorías, algunas nuevas y otras remozadas. La presencia de compuestos orgánicos en meteoritos y cometas ha llevado a especular que las materias primas necesarias para la vida aterrizaron procedentes del espacio exterior. Las versiones más extremas de esta línea admiten que, del espacio, no sólo llegaron los compuestos orgánicos inanimados, sino también organismos hechos y derechos. Algunos investigadores, a la vez que mantienen que la vida se produjo en la Tierra, piensan, sin embargo, que para entender mejor dicho evento serían necesarios otros descubrimientos; por ejemplo, encontrar vida en alguna otra parte, quizás en Marte o incluso en un sistema solar distinto.

Otros mantienen que la vida no comenzó en el espacio, o en el agua, cerca de la superficie, sino en surgencias termales del suelo oceánico. Para los defensores de esta teoría, esos humeros termales podrían haber proporcionado la protección y el flujo constante de energía y nutrientes necesarios para producir la materia animada. Quizá la última teoría, y la más prometedora a los ojos de algunos veteranos investigadores del origen de la vida, sea la que propone un abogado alemán, cuya distracción consiste precisamente en idear cómo pudo suceder. Explica que la vida comenzó como una especie de película chiclosa sobre la superficie de la pirita.

Ninguna de esas propuestas tiene apoyatura suficiente para convertirse en nuevo paradigma. Pero tampoco cabe excluir ninguna. Lo que no deja de molestar a Miller, tan riguroso experimentalista cuan severo crítico. Algunas teorías, propone, no merecen tomarse en serio. La hipótesis del origen espacial de la materia orgánica la considera "una pérdida de tiempo"; la de las surgencias termales, "basura"; la teoría de la pirita, "química de salón". Se queja de que tales trabajos perpetúan la mala reputación que tiene el campo del origen de la vida, siempre en el límite de la ciencia.

Otros, sin dejar de reconocer la debilidad de todas las teorías, contemplan todo este mundillo de una manera más favorable. "Es realmente excitante", comenta James P. Ferris, químico del Instituto Politécnico Rennselaer y editor de la revista *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*. "Tenemos todo tipo de nuevos ingredientes en la olla." Antes o después, aventura, surgirá alguna explicación convincente para el origen de la vida.

Construir un "boeing"

Algunos han argumentado que, con tiempo suficiente, se pueden dar hechos de apariencia incluso milagrosa. Por ejemplo, la manifestación espontánea de un organismo unicelular a partir de la unión aleatoria de ciertos compuestos químicos. A esto, sin

embargo, Fred Hoyle, astrónomo británico de temperamento iconoclasta, responde que tal cosa tiene la probabilidad de ensamblar un 747 por parte de un huracán que atravesase una chatarrería.

La mayoría de los investigadores están de acuerdo con Hoyle en este punto (aunque en poco más). Casi todos comparten que el proceso se aceleró tras una sucesión de acontecimientos, ninguno de los cuales es una locura improbable. Como muchas cosas en biología, este enfoque se remonta a Darwin, quien ya imaginó que la vida pudo comenzar cuando algunas sustancias químicas estimuladas por calor, luz o electricidad reaccionaron unas con otras y se generaron compuestos orgánicos de complejidad creciente. (Darwin también ofreció una explicación para nuestra incapacidad de observar, en la actualidad, la aparición de vida a partir del "barro" inanimado: cualquier organismo poco experimentado, escribió Darwin, sería ahora "inmediatamente devorado o absorbido" por los ya existentes.)

La versión del origen de la vida propugnada por Miller y otros también se puede contemplar en términos darwinianos. La vida comenzó, dicen ellos, cuando algún compuesto o tipo de compuestos desarrollaron la capacidad de autorreplicarse; por fuerza, debían ocasionalmente producir "errores" heredables. Esos errores originaban a veces generaciones de moléculas que se replicaban más eficazmente que sus predecesoras. *¡Voilá!* la evolución; y, con ella, la vida.

Durante cierto tiempo, después de los experimentos de Miller, las proteínas fueron las candidatas mejor colocadas para constituir las originales moléculas autorreplicativas; creíase, en efecto, que poseían capacidad de reproducirse y organizarse. A finales de los años cincuenta, Sidney Fox, hoy en la Universidad de Illinois, realizó experimentos que consolidaban ese punto de vista. Calentando repetidamente aminoácidos y disolviéndolos luego en agua, inducía su coagulación en diminutas esferas compuestas de breves cadenas proteínicas.

La explicación de Fox fue, y sigue siendo, que esos "protenoides" constituyeron las primeras células. Pero sus trabajos han perdido atractivo para muchos. Para Gerald F. Joyce, del Instituto de Investigaciones de la Clínica Scripps, una vez que se han producido los protenoides, "ahí se acaba todo. No pueden reproducirse o evolucionar". Otros investigadores, en particular Cyril A. Ponnamperuma, de la Universidad de Maryland, han seguido el trabajo donde Fox lo dejó, empeñándose en desarrollar proteínas que puedan autoensamblarse y reproducirse sin el concurso de los ácidos nucleicos.

¿El huevo o la gallina?

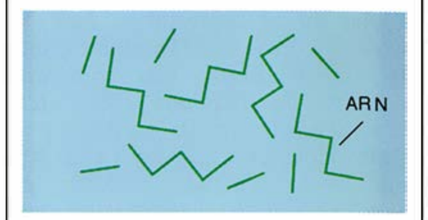
Muchos investigadores atribuyen a los ácidos nucleicos la primacía temporal en la autorreplicación, desde el origen. Los trabajos de Watson y Crick y otros han demostrado que las proteínas se fabrican siguiendo las instrucciones dictadas por el ADN. Pero hay un problema. El ADN no puede desempeñar su trabajo, ni siquiera su propia replicación, sin el concurso de proteínas catalíticas, o enzimas. En pocas palabras, no se pueden fabricar proteínas sin ADN, ni tampoco ADN sin proteínas. Es el clásico problema del huevo y la gallina, ¿qué fue primero: el ADN o las proteínas?

Los experimentos realizados a principios de los ochenta por Thomas R. Cech, de la Universidad de Colorado en Boulder, y Sidney Altman, de la Universidad de Yale, parecían ofrecer una respuesta: el ARN. Con anterioridad se había especulado con la posibilidad de que este ácido nucleico fuese la primera molécula autorreplicativa, pero nadie había podido demostrar cómo podría hacerlo, eficazmente, sin el concurso de enzimas. Cech y Altman descubrieron que ciertos tipos de ARN se comportaban como enzimas: se autofragmentaban en dos y se volvían a unir posteriormente.

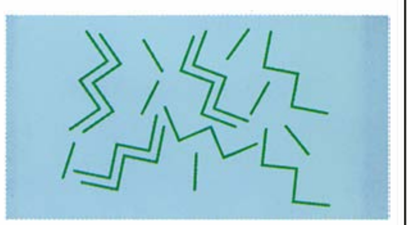
El descubrimiento, que mereció el premio Nobel para Cech y Altman en 1989, pasó en seguida a ser explotado por los investigadores del origen de la vida. Si el ARN podía comportarse como una enzima, razonábase, podría también autorreplicarse sin la ayuda de proteínas. El propio ARN haría de gen y de catalizador, de huevo y de gallina.

Walter Gilbert, biólogo de la Universidad de Harvard, acuñó la expresión "mundo de ARN" en 1986, y sigue siendo un entusiasta defensor de la teoría. Según él, el primer organismo estaría formado simplemente por moléculas de ARN autorreplicativas. A medida que evolucionaban, aprendieron a sintetizar proteínas que le ayudaban a replicarse más rápidamente, y lípidos que formaban una pared celular. Por último, el organismo de ARN dio origen al ADN, una

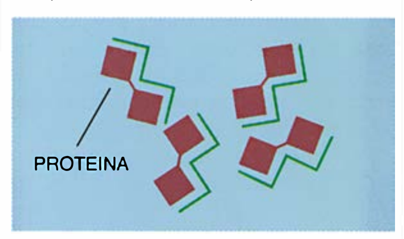
EVOLUCION VIA MUNDO DE ARN



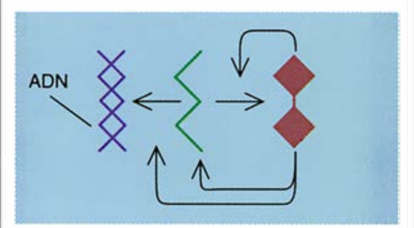
El ARN se forma con ribosa y otros compuestos orgánicos.



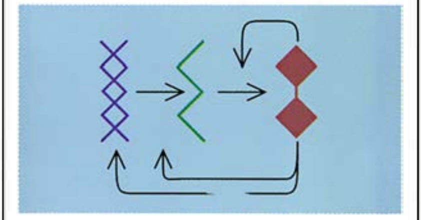
A medida que las moléculas de ARN evolucionan, "aprenden" a autocopiarse.



Las moléculas de ARN comienzan a sintetizar proteínas, que pueden actuar de catalizadores.



Las proteínas ayudan al ARN a replicarse y sintetizar proteínas con mayor eficacia. También ayudan al ARN a fabricar su versión bicatenaria, que acaba evolucionando hacia el ADN.



El ADN toma el mando. Utiliza al ARN para fabricar proteínas, que a su vez ayudan al ADN a autorreplicarse y transferir su información genética al ARN.

molécula mejor preparada para almacenar la información genética.

Los biólogos han podido reproducir algunos actos de este drama molecular en el laboratorio. Jack W. Szostak y otros, del Hospital General de Massachusetts, han construido moléculas de ARN que actúan una y otra vez como enzimas, cortando y pegando moléculas, incluidas ellas mismas. En un principio, el ARN "enzima" se limitaba a realizar procesos sencillos. Szostak intenta ahora demostrar que tales moléculas pueden encapsularse en una membrana, a imagen de la célula.

Un mundo de ARN

Manfred Eigen, del Instituto Max Planck de Química Biofísica, de Gotinga, ha examinado lo que se piensa es un escalón tardío en la evolución del ARN. A tenor de sus experimentos, el ARN, estimulado por enzimas y otros aditamentos suministrados por el experimentador, puede adaptarse y evolucionar. Este fenómeno, denominado evolución dirigida, encierra una enorme potencialidad como generador de nuevos compuestos.

Pero mientras más se profundiza en el concepto de mundo de ARN, más problemas surgen. ¿Cómo se originó el primer ARN? Si no resulta fácil sintetizar el ARN y sus componentes en el laboratorio, ni siquiera en las mejores condiciones, cuánto menos en las condiciones prebióticas que se suponen. El proceso mediante el cual se crea el azúcar ribosa, componente clave del ARN, origina también una serie de azúcares que pueden inhibir la síntesis de ARN. Además, nadie explica satisfactoriamente por qué el fósforo, una sustancia de abundancia limitada en la naturaleza, es un ingrediente esencial del ARN (y del ADN).

Una vez sintetizado el ARN, sólo alcanzará a autorreplicarse si el experimentador se lo facilita bastante, dice Joyce, de la Clínica Scripps, un especialista en ARN. "Es una molécula inepta", añade, "especialmente si se le compara con las proteínas". Leslie E. Orgel, del Instituto Salk de Estudios Biológicos, reputado experto en las condiciones del mundo del ARN, está de acuerdo con Joyce. Los experimentos que simulan las etapas tempranas del mundo de ARN son demasiado complicados para considerarlos réplicas verosímiles del escenario donde se desarrolló el origen de la vida, afirma tajante Orgel. Y añade, "es preciso conseguir que muchísimas cosas funcionen bien, y que no haya ningún error".

Orgel ha llegado a la conclusión de que alguna molécula más sencilla, muy distinta quizá, pudo haber preparado el terreno al ARN. Identificar dicho compuesto no será fácil. La química de los ácidos nucleicos, señala, descansa sobre una sólida base de conocimientos, y aventurarse a salir de ese camino supone volver a empezar. Pero algunos han acabado por sumergirse en lo desconocido. El verano del año pasado, el grupo dirigido por Julius Rebek, Jr., del Instituto de Tecnología de Massachusetts, armó un considerable revuelo al anunciar que había conseguido crear una molécula orgánica sintética con capacidad autorreplicativa. La molécula, el éster triácido de la aminoadenosina (ETAA), consta de dos compuestos que, por su estructura química, recuerdan a las proteínas y a los ácidos nucleicos. Las moléculas de ETAA, en cloroformo y con los correspondientes sustratos, sirven de molde para la formación de nuevas moléculas de ETAA.

Los experimentos de Rebek presentan dos inconvenientes, según Joyce. La replicación se produce en condiciones muy artificiales, poco naturales; y lo que es más importante aún, con demasiada fidelidad. Sin mutación, la molécula no puede evolucionar en sentido darwinista. Orgel abunda en esa idea. "Lo que Rebek hace es muy ingenioso", dice, "pero no veo qué interés pueda tener para el problema del origen de la vida".

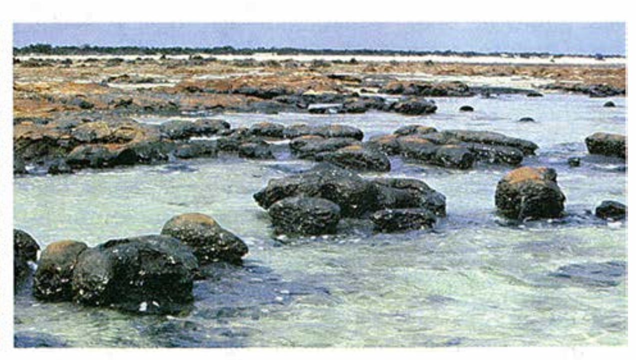
La solución del origen de la vida parece estar más lejos que nunca. "La bacteria más elemental es tan condenadamente complicada, desde el punto de vista químico, que resulta casi imposible imaginar cómo ha surgido", resume Harold P. Klein, de la Universidad de Santa Clara, presidente de una comisión de la Academia Nacional de las Ciencias que ha revisado recientemente las investigaciones sobre el origen de la vida. (Su conclusión es que hace falta investigar mucho más.)

Aun cuando los científicos consigan crear en el laboratorio algo con propiedades similares a la vida, habrá que seguir preguntándose: ¿sucedió así en realidad? Dar respuesta a esa pregunta será extraordinariamente difícil, ya que las placas tectónicas, el vulcanismo y la erosión han borrado la mayoría de las señales de los primeros miles de años de existencia de la Tierra. Para estimar la edad del planeta, por ejemplo, los investigadores deben recurrir a los meteoritos, presuntas reliquias de la era en la que el sistema solar se condensó a partir de una nube de gas y polvo. Las mediciones de radiactividad en los meteoritos apuntan a que su origen, y por tanto el de la Tierra, se remonta a unos cuatro mil quinientos millones de años.

El verdín de la Tierra

Para establecer las condiciones en las que se originó la vida, es necesario saber cuándo se produjo tal acontecimiento. Los científicos pensaban en un principio que debieron de pasar miles de millones de años antes de que la materia inerte adquiriese vida.



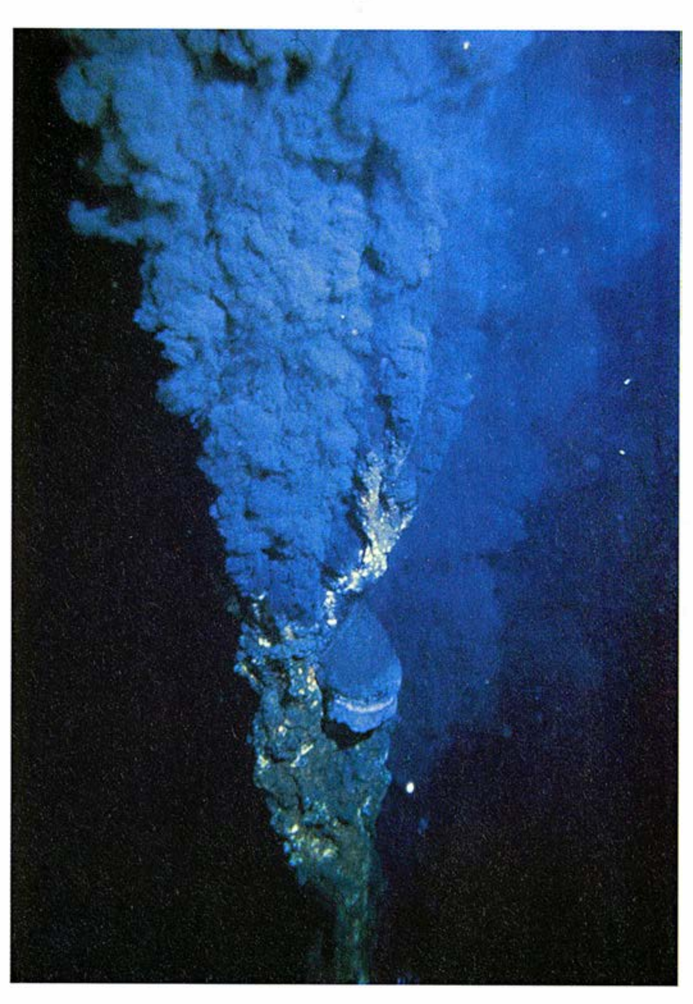



2. FOSILES DE 3500 MILLONES DE AÑOS, entre los que cabe mencionar unas hileras de células semejantes a las cianobacterias, o algas azul verdosas (*izquierda*) y un estromatolito (*centro*) encontrado en el oeste de Australia. Hay estromatolitos en ese (*derecha*) y en otros continentes.

La razón de esa postura radica en el registro fósil de los organismos pluricelulares, desde los trilobites hasta el neandertal, que datan sólo de unos 600 millones de años. (*Homo sapiens* apareció hace menos de un millón de años.) En las últimas décadas, sin embargo, los paleontólogos han precisado que antes de que surgiesen los organismos pluricelulares, la Tierra estuvo probablemente poblada durante miles de millones de años por criaturas sencillas, como las algas, o "verdín de charcas", según dice J. William Schopf, de la Universidad de California, especialista en protofósiles.

Schopf y otros han acumulado lo que ellos creen pruebas inequívocas de que la vida existió hace por lo menos tres mil quinientos millones de años. Entre dichas pruebas están dos series de fósiles encontradas en determinados puntos de Australia y Sudáfrica, cuyas edades han sido establecidas por métodos radiactivos. Uno de esos fósiles son unas masas rocosas de color pardo-verdoso, que revelan la antigua presencia de estromatolitos, densas formaciones de microbios que aún se pueden encontrar en algunos lugares del mundo, creciendo en aguas templadas poco profundas. Los otros fósiles muestran la impronta microscópica de hileras de células que recuerdan a las modernas cianobacterias, también llamadas algas azul verdosas. Schopf defiende que los organismos primitivos, igual que las cianobacterias en la actualidad, utilizaban probablemente la fotosíntesis y liberaban oxígeno como subproducto.

Manfred Schidlowski, del Instituto Max Planck de Química en Maguncia, ha encontrado pruebas de que en tiempos muy remotos existieron tales organismos fotosintéticos. Las pruebas proceden de unas rocas sedimentarias parcialmente fundidas, y con una antigüedad de tres mil ochocientos millones de años, halladas en Isua, Groenlandia. Son estas las rocas "parlantes" terrestres más antiguas. (Las que tienen el récord absoluto, con cuatro mil doscientos millones de años, son los cristales de circón, descubiertos en Australia, aunque son mudos con respecto al pasado.) El hecho de que las rocas de Isua sean sedimentarias revela la pasada presencia de agua, un prerrequisito para la vida. Según Schidlowski, la presencia de carbono en las rocas indica también que estuvieron contaminadas con organismos fotosintéticos, quienes muestran preferencia por ciertos isótopos de carbono.



3. SURGENCIAS HIDROTERMALES SUBMARINAS, descubiertas a finales de los años setenta. Estos humeros pueden haber suministrado nutrientes y cobijo a los primeros organismos del planeta, según algunos investigadores.

Este intento de viajar por el túnel del tiempo a golpe de registro fósil ha sido acogido con cierto escepticismo. David J. Des Marais, del Centro Ames de la NASA, opina que la huella de carbono en las rocas de Isua es demasiado débil para extraer conclusiones. Roger Buick, paleontólogo australiano que enseña en Harvard, opina que el escepticismo debe ampliarse también a los estromatolitos y microfósiles de tres mil quinientos millones de años, sobre cuyo origen biológico, sin embargo, no existe discusión, a diferencia de lo que sucede con las rocas de Isua. Según Buick, los estromatolitos podrían ser sedimentos deformados por procesos geológicos, y los microfósiles "pequeños rastros de 'excrementos'". "Dudofósiles", los llama él. Los fósiles que muestran con claridad una estructura celular datan de tres mil cien o tres mil doscientos millones de años, sostiene.

Otros expertos en fósiles arqueanos, entre ellos Donald R. Lowe, de la Universidad de Stanford, piensan que Buick y quizás incluso Des Marais, pecan de exagerado escepticismo. Aunque uno por uno los fósiles se prestan a interpretaciones discrepantes, dice Lowe, cuando se suman sugieren que la vida era "amplia, diversa y harto compleja" hace tres mil quinientos millones de años, y probablemente estaba ya en marcha antes de los tres mil ochocientos millones de años. Si el escenario es correcto, la vida tuvo que evolucionar y sobrevivir en circunstancias poco agradables, con períodos de auténtico infierno.

Después de analizar los cráteres lunares, que a modo de escritura Braille conforman un registro de la cadencia de impactos en el joven sistema solar, grupos dirigidos por los geofísicos David J. Stevenson, del Instituto de Tecnología de California, y Norman M. Sleep, de Stanford, han concluido, hace un par de años, que los meteoritos y cometas, a fuerza de chocar contra la Tierra, podrían haber impedido la emergencia de vida durante cientos de millones de años. Muchos de los proyectiles habrían sido bastante mayores que los objetos, de unos 10 kilómetros de anchura, que se cree acabaron con los dinosaurios en la transición entre los períodos Cretácico y Terciario, hace unos 65 millones de años.

Los impactos de grandes objetos,

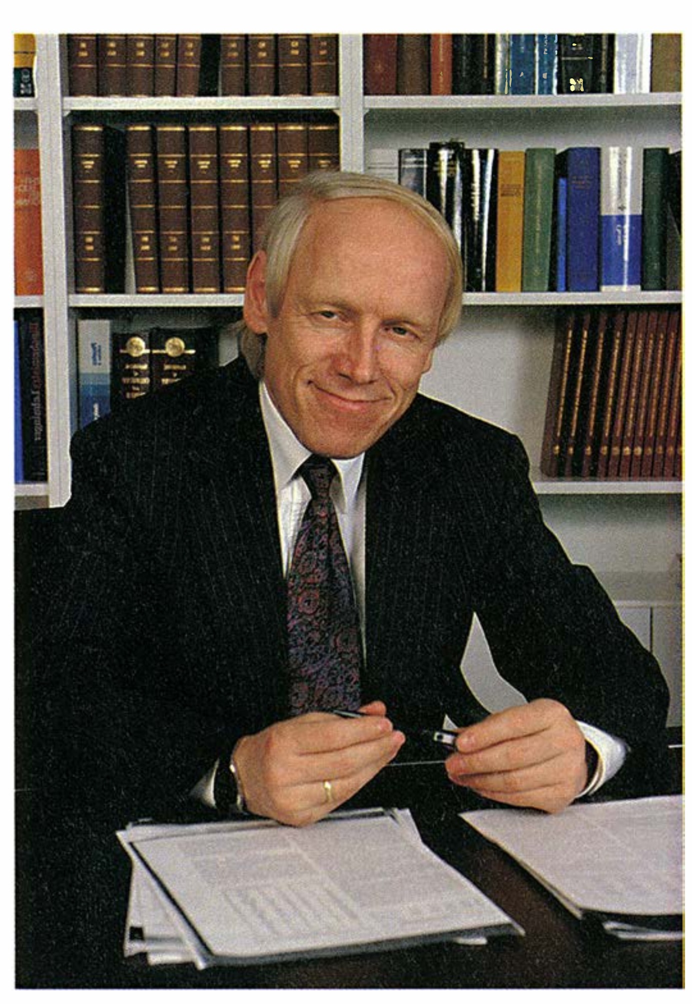
dice Sleep, habrían generado calor suficiente para poner en ebullición la superficie de los océanos, si no para convertirlos enteramente en vapor. Las colisiones habrían también arrojado a la atmósfera enormes nubes de polvo y rocas fundidas. La implicación de todo esto es dramática: como mínimo, los impactos habrían destruido la vida incipiente en tierra firme o en cualquier sitio próximo a la superficie de los océanos, hasta hace unos 3800 millones de años. La vida que dependiera de la fotosíntesis habría sido la más sensible.

Según parece, además, la composición de la atmósfera durante ese período podría no haber sido tan favorable a la síntesis de compuestos orgánicos como se había pensado. Ese tradicional punto de vista se debe a Harold C. Urey, de la Universidad de Chicago, laureado con el premio Nobel de química. Propuso que la atmósfera tenía un carácter reductor, rica en gases hidrogenados, como el metano y el amonio, que vemos abundan en Saturno, Júpiter y Urano. El trabajo de Urey inspiró a Miller, alumno suyo, quien realizó su famoso experimento en 1953.

Con todo, durante los últimos diez años han crecido las dudas sobre las hipótesis de Urey y Miller acerca de la atmósfera. Experimentos de laboratorio y reconstrucciones computerizadas de la atmósfera, realizadas por James C. G. Walker, de la Universidad de Michigan en Ann Arbor, y otros, sugieren que las radiaciones ultravioletas procedentes del Sol, hoy frenadas gracias al ozono atmosférico, habrían destruido las moléculas hidrogenadas de la atmósfera; el hidrógeno libre habría escapado al espacio.

Según esos experimentos, el principal componente de la atmósfera fue el dióxido de carbono y el nitrógeno liberado por los volcanes. Una atmósfera así no habría sido la más conveniente para la síntesis de aminoácidos y otros precursores de la vida. De acuerdo con los recientes cálculos de James F. Kasting, de la Universidad estatal de Pennsylvania, el dióxido de carbono podría haber creado también un efecto de invernadero de tal calibre que las temperaturas de la superficie de la Tierra habrían alcanzado casi el punto de ebullición del agua.

El modelo de atmósfera reductora sigue contando con sus defensores. Miller, entre ellos, señala que los humos y nubes habrían protegido, de las radiaciones ultravioletas, a los delicados gases hidrogenados. "Hay un montón de gente haciendo modelos matemáticos, que niegan la existencia de metano", señala, "pero no tienen pruebas reales". Un informe reciente de investigadores de la Universidad nacional de Yokihama apoya la postura de Miller. Los japoneses argumentan que la rotura de moléculas de agua, por acción de partículas solares y rayos cósmicos, podría haber estimulado la síntesis de hidrógeno libre y, por tanto, de metano y amonio.



4. ¿PROCESO PATENTADO? Günter Wächtershäuser, abogado especializado en patentes, ha propuesto una nueva teoría sobre el origen de la vida.

No obstante, las investigaciones de los impactos y la atmósfera, junto con la creencia de que ya existían organismos primitivos hace 3800 millones de años, ha llevado a algunos a sospechar que la vida no se incubó en remansos túrbidos de mareas, sino en el fondo de los océanos. A finales de los años setenta, se descubrieron varios humeros o surgencias hidrotermales en fondos marinos, cerca de las islas Galápagos.

Los humeros alojan florecientes comunidades de organismos, como gusanos, almejas y bacterias, cuya fuente primaria de energía no es la luz, sino los compuestos azufrados emitidos por las surgencias. De entonces acá se han descubierto docenas de humeros similares, generalmente cerca de las cordilleras submarinas que se crean en las zonas de confluencia de dos placas tectónicas.

Uno de los principales defensores de las surgencias como fuente de vida es John B. Corliss, del Centro de Vuelos Espaciales de la NASA, miembro del equipo que identificó una de las primeras surgencias. Los humeros pudieron haber aportado, señala, la energía y nutrientes necesarios para crear y mantener la vida. El interior de las surgencias, prosigue, habría proporcionado también protección contra los efectos nocivos de buena parte de los impactos extraterrestres. (Según el propio Corliss, las modernas especies de las surgencias, que viven en las aguas de sus alrededores, más frías en comparación, son probablemente colonos recientes y no descendientes directos de los habitantes originales.)

Un apoyo importante a la hipótesis de los humeros procede de unos estudios sobre organismos unicelulares, dirigidos por Carl R. Woese, de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. Comparando la composición genética de dichos organismos, Woese ha identificado un tipo de microbios, o archibacterias, que parece haber sufrido menos cambios evolu-

tivos que cualquier otra especie viva. Todas las archibacterias prefieren ambientes cálidos. Algunas aguantan temperaturas de hasta 120 grados Celsius. Ciertas especies prefieren también un ambiente acídico, anóxico, con un flujo estable de azufre, precisamente las condiciones que se encuentran en los humeros hidrotermales.

Norman R. Pace, biólogo de la Universidad de Indiana, encuentra sugestiva la teoría de las surgencias. Su visión de la corteza de la Tierra primordial es la de una capa rocosa, delgada y turbia, acribillada por miles de humeros hidrotermales. Sin embargo, a diferencia de Corliss, quien insiste en que la vida se originó en las surgencias, Pace sostiene que los primeros organismos pudieron engendrarse en otros lugares, quizás en la superficie de la Tierra o en su vecindad, durante los intervalos entre impactos; más tarde se desplazarían hasta encontrar la relativa seguridad de las surgencias, en aguas profundas. Impactos posteriores pudieron eliminar a todos los organismos, salvo aquéllos que permanecieron ocultos en las surgencias. Esos organismos hidrotermales, aunque no fuesen los primeros pobladores de la Tierra, podrían haber sido los ancestros de todos los organismos vivos. Pace cree que todavía hoy deben de existir grandes comunidades de bacterias colonizando verdaderas redes de grietas y cavernas, que se esconden bajo las cordilleras centro-oceánicas, en zonas donde la temperatura del agua es alta.

Historias azufradas

A Miller no le gustan las fuentes termales, al menos como sede original de la vida. Sostiene que las modernas surgencias duran poco, unas décadas, para taponarse después. Además, él y Jeffrey L. Bada, también de la Universidad de California en San Diego, han hecho experimentos que sugieren que el agua supercaliente del interior de los humeros, que a veces sobrepasa los 300 grados Celsius destruiría más que crearía compuestos orgánicos. Si la superficie de la Tierra fuese una sartén, dice Miller, la surgencia hidrotermal sería el fuego.

No obstante, la hipótesis de los humeros ha operado en favor de tres teorías, dos nuevas y otra un poco trasnochada, que ofrecen alternativas al ARN (o a sus precursores). La última y más insólita se la debemos a Günter Wächtershäuser, un fenóme-

GENESIS EN SILICIO

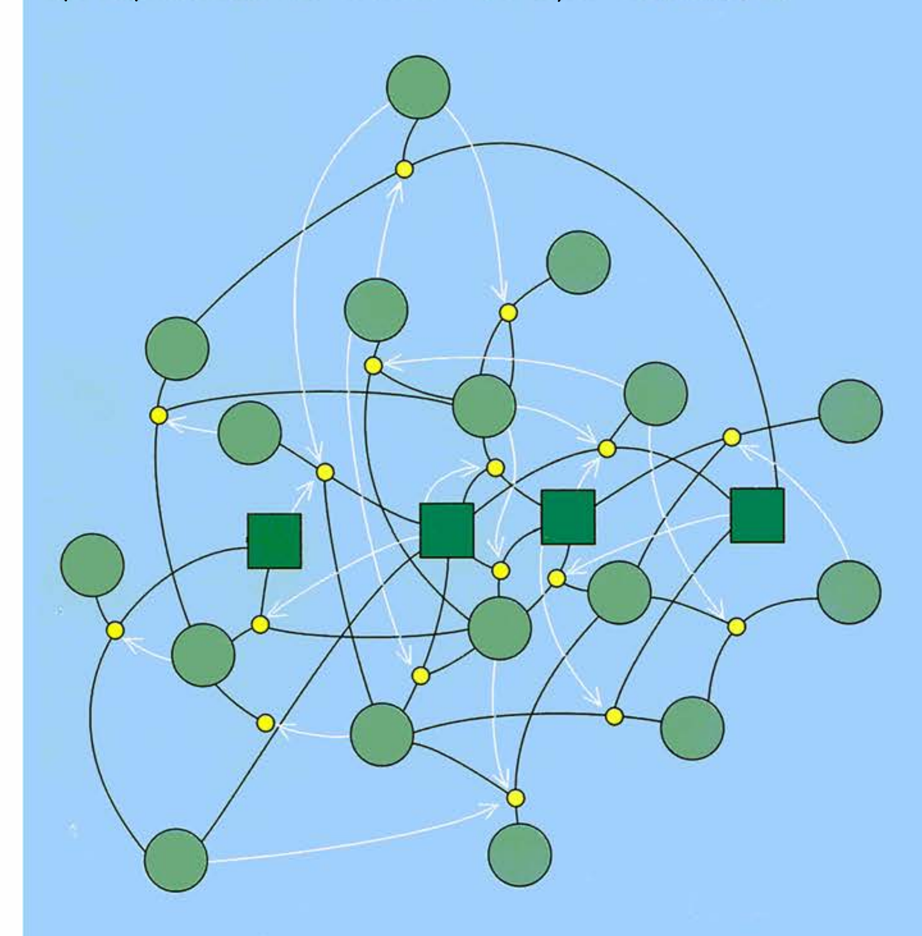
Aunque los métodos tradicionales de comprobar la veracidad de las teorías sobre el origen de la vida mezclan compuestos químicos reales en tubos de ensayo no menos reales, algunos investigadores intentan remedar la creación en la redoma del ordenador. Stuart A. Kauffman, biólogo a caballo entre la Universidad de Pennsylvania y el Instituto Santa Fe de Nuevo México, es uno de los pioneros de esa "vida artificial".

Sospecha que la vida puede depender de un principio que genere orden a partir de interacciones químicas aleatorias. Para someter a prueba dicha hipótesis, él y sus colegas del Instituto Santa Fe simulan en el ordenador interacciones entre polímeros genéricos con una actividad catalítica genérica.

Sea, por ejemplo, un caso simple en el que monómeros sencillos (*cuadrados*) con cierta actividad catalítica (*flechas blancas*) disparan una cascada de reacciones químicas (*líneas negras y círculos amarillos*) entre los polímeros (*círculos verdes*), que a su vez catalizan nuevas reacciones. Según Kauffman, las simulaciones demuestran que, si a un sistema se le proporciona un número suficiente de polímeros de ese tipo, experimentará una "transición de fase" que le hará alcanzar un estado "autocatalítico". Esto es, el sistema empezará, de manera espontánea, a generar polímeros de complejidad y capacidad catalítica crecientes.

Kauffman está convencido de que un proceso como ése fue el que condujo a la vida, y no la formación casual de un solo tipo de molécula con capacidad de evolucionar. Preguntado si tiene algún resultado experimental con el que acompañar sus simulaciones de ordenador, responde que "nadie ha llevado esto a los tubos de ensayo, pero estoy seguro que llevo razón".

Los puristas del tubo de ensayo lo toman a broma. "Jugar con ecuaciones en el ordenador no es hacer experimentos", sentencia Stanley L. Miller, de la Universidad de California en San Diego. Gerald Joyce, del Instituto de Investigación de la Clínica Scripps, otro experimentalista, también se muestra escéptico. Pero señala que las investigaciones sobre inteligencia artificial, que sufrieron la sorna de los neurólogos al viejo estilo, han empezado a hacer importantes contribuciones al estudio del cerebro. "Si la vida artificial pudiese hacer algún día lo mismo por el problema del origen de la vida", dice Joyce, "sería fantástico".



no algo insólito él mismo. Abogado en ejercicio, Wächtershäuser fundó y dirige una empresa en Múnich especializada en patentes. Antes de dedicarse a esos menesteres, se doctoró en química orgánica, de donde le viene un apasionado interés por el origen de la vida.

Ya como simple observador, empezó a desarrollar sus propias ideas hace unos cinco años. Mientras la mayoría de los investigadores dan por sentado que la vida comenzó cuando ciertos compuestos relativamente sencillos adquirieron la capacidad de autorreplicarse en solución, Wächtershäuser defiende que la vida empezó siendo un proceso metabólico, esto es, una reacción química cíclica dirigida por alguna fuente energética, que tuvo lugar en una superficie sólida.

Aunque la idea no es nueva, sí lo es en la forma en que la propone Wächtershäuser. Como superficie sólida aboga por la pirita, un mineral metálico formado por una molécula de hierro y dos de azufre. La pirita se ha encontrado también en las surgencias, lo que no encierra ningún misterio, pues se halla por todas partes. Según su hipótesis, la pirita ofrece también una superficie cargada positivamente donde pueden engarzarse compuestos orgánicos sencillos. La continua formación de pirita a partir de hierro y azufre produce energía, en forma de electrones, necesaria para conseguir que los compuestos orgánicos reaccionen unos con otros y aumenten su complejidad.

La primera célula, según esta hipótesis, pudo haber sido un grano de pirita rodeado por una membrana de compuestos orgánicos. Dicha "célula", podría autorreproducirse si fuese capaz de producir "yemas" cristalinas que, una vez englobadas en su correspondiente membrana, quedasen libres.

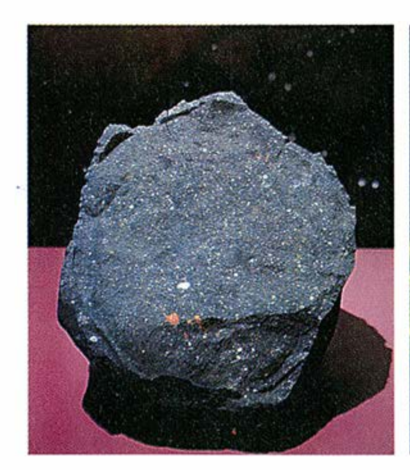
El químico-abogado publicó sus ideas en revistas del prestigio de los *Proceedings of the National Academy of Sciences, Microbiology Reviews* y *Nature*. Experimentos realizados por un grupo de la Universidad alemana de Regensburg apoyan también en cierta medida ese papel de "batería" para la pirita. El propio Wächtershäuser admite, sin embargo, que su teoría es todavía en su mayor parte una "pura especulación".

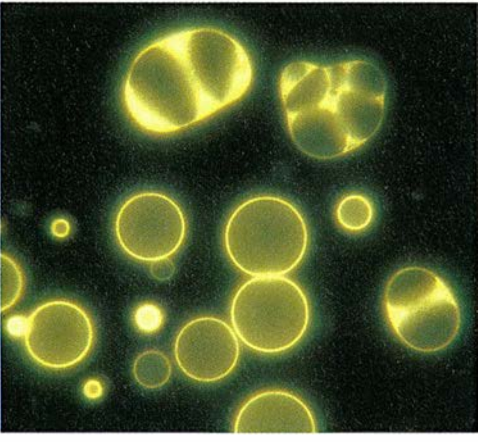
Sus ideas, sin embargo, han fascinado, entre otros, a Pace, Woese y a Karl Popper, filósofo de la ciencia. Pace dice que el modelo de Wächtershäuser, basado en un protometabolismo "superficial", podría dejar obsoleto el viejo paradigma de la autorreplicación en solución.

Otros no están tan fascinados. Joyce sospecha que Wächtershäuser se ha valido de sus habilidades como hombre de leyes para granjearse una aceptación mayor de la que en realidad merece su teoría. "Es un excelente abogado de su propia causa", observa Joyce. Admite, no obstante, su perplejidad ante el paralelismo entre Wächtershäuser y otro científico alemán que no dejaba de crear mientras trabajaba en asuntos relacionados con las patentes: Albert Einstein. "Dado el precedente", señala Joyce con cierta sorna, "sospecho que lo mejor que podríamos hacer es tomarlo en serio".

Christian R. de Duve, profesor emérito de la Universidad Rockefeller, premio Nobel en 1974 por sus trabajos sobre estructura celular, ha propuesto un modelo que guarda cierta similitud con el de Wächtershäuser. En dicho modelo, descrito en el libro *Blueprint for a Cell*, desempeñan un papel importante los tioésteres, unos compuestos azufrados. Los tioésteres, fundamentales en el metabolismo celular, pudieron constituir, opinan algunos, la fuente de energía en las células primitivas.

De Duve propone que los tioésteres de la sopa primordial podrían haber desencadenado una cascada de reacciones químicas parecidas a las que se producen en el moderno metabolismo celular. Las reacciones habrían sido catalizadas por "protoenzimas", formadas también a partir de los tioésteres. Esas reacciones acabarían en la síntesis de ácidos ribonucleicos, en el mundo de ARN. La síntesis de tioésteres precisa un ambiente acídico y caliente, que según de Duve pudo ser suministrado por las surgencias hidrotermales. "Me gustaría ver las pruebas experimentales", replica Miller.





5. VACUOLAS CELULARES fabricadas con compuestos orgánicos extraídos de una condrita carbonácea que se estrelló cerca de la ciudad australiana de Murchison, en el año 1969.

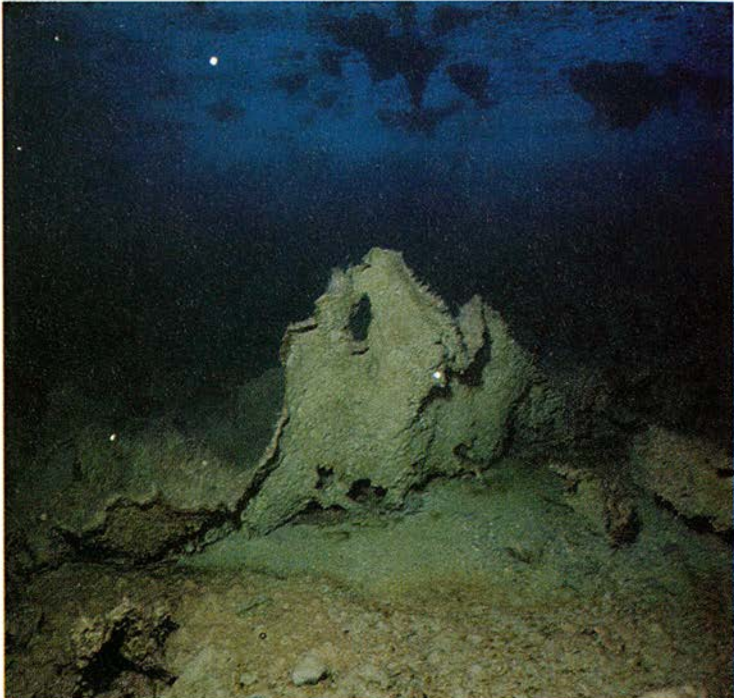
Hechos de barro

A. G. Cairns-Smith, químico de la Universidad de Glasgow, dice tener una buena razón para dudar de la teoría de Duve; tal teoría se basa en una propuesta avanzada por él mismo y David C. Mauzerall, de la Rockefeller, sobre cómo una reacción química en la que intervienen hierro y agua pudo haber enriquecido de hidrógeno la atmósfera primordial. "Lo que de Duve omite", apunta Cairns-Smith, "es que, como consecuencia de ese proceso, los océanos son sitios *poco* idóneos para la síntesis de moléculas orgánicas".

Durante más de una década, Cairns-Smith ha estado promocionando su propia teoría. Igual que Wächtershäuser, propone que la vida se originó sobre un sustrato sólido, habitual en las surgencias y en casi cualquier otra parte, aunque él prefiere los cristales de arcilla a la pirita. Todo cristal está formado por unidades autorreplicativas, apunta Cairns-Smith, pero los cristales de arcilla tienen suficiente complejidad como para mutar y evolucionar de forma parecida a como lo hace la vida. Algunas arcillas pudieron mejorar su potencial reproductor, desarrollando la capacidad de atraer o sintetizar compuestos orgánicos, como ácidos nucleicos o proteínas. Con el tiempo, los compuestos orgánicos llegaron a ser tan refinados que comenzaron a replicarse y evolucionar.

A diferencia de algunos teóricos del origen de la vida, Cairns-Smith admite gustosamente los puntos débiles de su hipótesis. Nadie ha detectado nunca arcilla en algo que pudiera





6. LAGO ANTARTICO con florecientes comunidades microbianas bajo su helada superficie. Este tipo de descubrimientos mantiene la esperanza de encontrar vida también en las aguas heladas de Marte; igual que la Antártida de la Tierra, el planeta rojo es extremadamente frío y seco.

considerarse evolución, en experimentos de laboratorio, ni nadie ha encontrado tampoco nada parecido a un organismo arcilloso en la naturaleza. Lo que no le obsta para sostener que, de todas las teorías basadas en la existencia de compuestos orgánicos que se organizan y replican sin ayuda externa, esa es la mejor. "Las moléculas orgánicas son demasiado escurridizas cuando van por ahí sueltas."

Invasores

Hay otra escapatoria para esa suerte de callejón sin salida al que se ha llegado con las teorías. Si ni la atmósfera ni las surgencias han proporcionado el habitáculo idóneo para la síntesis de compuestos orgánicos complejos, ¿por qué no pensar que éstos han venido de otra parte, por ejemplo, del espacio exterior? Juan Oró, de la Universidad de Houston, planteó ya esa posibilidad en los años sesenta. La idea parece haber cobrado un nuevo impulso ahora que los astrónomos han descubierto espectros reveladores de la presencia de una gran variedad de compuestos orgánicos alrededor de ciertas estrellas, y en los espacios interestelares.

Se han encontrado también aminoácidos en ciertos meteoritos, las condritas carbonáceas, que representan aproximadamente el 5 por ciento de los meteoritos que se estrellan contra la Tierra. Las observaciones del cometa Halley, que pasó por la Tierra hace unos cinco años, sugieren que los cometas pueden tener un contenido en compuestos orgánicos aún mayor que el de las condritas carbonáceas.

Las condritas contienen también hidrocarburos, alcoholes y otros compuestos grasos, que podrían haber participado en la formación de las membranas que protegieron a las células primitivas. David D. Deamer, bioquímico de la Universidad de California en Davis, ha fabricado membranas esféricas, o vesículas, con compuestos obtenidos de un meteorito que cayó cerca de Murchison, Australia, en 1969. Esas vesículas, dice Deamer, pudieron haber proporcionado un ambiente adecuado para que los aminoácidos, nucleótidos o cualquier otro compuesto orgánico, sufriesen las transformaciones necesarias para que se produjese la vida.

La hipótesis según la cual los impactos pudieron haber creado el escenario para la vida, y retrasado también su puesta en marcha, ganó fuerza en 1989; la causa: el descubrimiento de aminoácidos por encima y por debajo de una capa arcillosa, depositada en la transición Cretácico-Terciario. Bada y Meixun Zhao, también de San Diego, determinaron que los aminoácidos no eran de tipo biológico, encontrados hasta entonces sólo en los meteoritos. Sus conclusiones parecen apoyar la teoría del impacto para explicar la extinción de los dinosaurios, amén de mostrar que los grandes impactos pudieron fertilizar la Tierra con compuestos orgánicos.

Hay que dar, no obstante, respuesta a ciertas preguntas. ¿Por qué se encontraron aminoácidos por encima y por debajo de la capa del Cretácico-Terciario, y no en la misma capa? ¿Cómo pudieron soportar el enorme calor generado por el impacto? Cálculos realizados por Christopher F. Chyba, estudioso de los planetas, de la Universidad de Cornell, y otros, apuntan a que cualquier objeto extraterrestre de tamaño suficiente para proporcionar cantidades notables de material orgánico a la Tierra generaría tanto calor durante su impacto, que quedaría convertido en cenizas.

En noviembre del año pasado, Kevin J. Zahanle y David Grinspoon, del Centro Ames de la NASA, propusieron una salida a ese problema. Según ellos, los aminoácidos provienen de uno o más cometas que no se estrellaron contra la Tierra, sino que simplemente pasaron muy cerca, dejando una estela de restos orgánicos, antes y después del impacto del Cretácico-Terciario. De esa manera, aseguran, los cometas pudieron rociar la Tierra de compuestos orgánicos, en las fases más tempranas de su historia.

Chyba habla de otras formas posibles que tendrían los impactos de contribuir al suministro de materias pri-

mas para la vida. El calor y las ondas de choque procedentes de un impacto podrían desencadenar las reacciones químicas en la atmósfera que sintetizan compuestos orgánicos. El objeto extraterrestre podría romperse hasta el punto de que la atmósfera frenara su carrera y aterrizar casi intacto.

Panspermia

Otros reputan inverosímil cualquier modelo de impacto. "Es como maná llovido del cielo", dice Sherwood Chang, de la NASA, experto en compuestos orgánicos extraterrestres. Según Chang, hay que dedicar mayor esfuerzo a investigar cómo se pudieron sintetizar los compuestos orgánicos en la Tierra, en vez de dar por supuesto que los cuerpos celestes hicieron el trabajo. Las teorías que dan a los impactos una participación en el origen de la vida "están ahora muy de moda", añade, "pero carecen de solidez observacional".

La versión más extremista de la hipótesis del maná espacial es la panspermia. Esta teoría fue propuesta a finales del siglo pasado por el químico sueco Svante A. Arrhenius; mantenía éste que los microbios que pululaban por el universo hicieron de "semilla de la vida" en la Tierra. Más recientemente, Hoyle y un antiguo alumno suyo, el astrónomo N. Chandra Wickramansinghe, de Sri Lanka (conocidos también por su oposición a la teoría de la gran explosión), siguen promocionando la misma idea; y van más lejos: esos microbios extraterrestres son la causa de la gripe, SIDA y otras enfermedades.

La mayoría de los científicos rechazan de plano esas ideas, por la sencilla razón de que nunca se han encontrado microbios en el espacio, y es muy improbable que se encuentren, dado su carácter de ambiente hostil para la vida. Ello no obstante, los experimentos realizados por J. Mayo Greenberg, astrofísico de la Universidad holandesa de Leiden, prestan cierta credibilidad a la panspermia. Según Greenberg, una célula "desnuda" podría sobrevivir durante cientos de años en el espacio, y hasta 10 millones de años si está protegida de las radiaciones por una fina capa de hielo.

Greenberg opina que es todavía difícil imaginar cómo los organismos pudieron abandonar otros planetas o llegar intactos hasta el nuestro. En sintonía con la mayoría de los científicos, cree que la vida empezó en la Tierra. Pero reconoce que la hipótesis de la panspermia, aunque improbable e incómoda para muchos, no puede ser descartada, a la vista de sus resultados experimentales.

Hace unos diez años, Orgel y Crick se las arreglaron para provocar al público y a sus colegas, especulando con la posibilidad de que las semillas de la vida fuesen enviadas a la Tierra en un ingenio espacial por seres inteligentes de otros planetas. Orgel comenta que la propuesta, conocida como panspermia dirigida, fue "una especie de broma". Pero añade que tenía una intención seria: llamar la atención sobre las carencias de todas las teorías sobre el origen terrestre de la vida. Lo escribió Crick en cierta ocasión: "El origen de la vida parece casi un milagro, tal es la cantidad de condiciones que deberían haberse cumplido para que se pusiese en marcha".

¿Estamos solos?

Otros, sin embargo, piensan que la génesis de vida, lejos de ser un milagro, constituye quizás un fenómeno más que común. De hecho, la aparente rapidez con que surgió la vida en la Tierra y la abundancia de moléculas orgánicas en el espacio sugieren que la vida pudo originarse en cualquier otra parte del universo, razona John D. Rummell, director del programa de exobiología de la NASA. Encontrar pruebas de la existencia de dicha vida, señala, además de ser un hecho histórico en sí mismo, aclararía muchos aspectos relacionados con el comienzo de la misma en la Tierra.

La NASA está ampliando su programa SETI, de búsqueda de inteligencia extraterrestre, con el que rastrea el espectro electromagnético en búsqueda de señales que puedan ser emitidas por otra civilización. Durante la próxima década, los investigadores de la NASA estudiarán las señales de radio procedentes de todo el cielo, centrándose en unas 700 estrellas bastante cercanas a la Tierra, en las que se sospecha la existencia de planetas. La NASA ha desarrollado equipos que permiten a un solo radiotelescopio rastrear miles de millones de canales simultáneamente y seleccionar las señales sospechosas.

Se investiga de nuevo la posibilidad de vida en nuestro vecino más próximo, Marte. El investigador McKay, de la NASA, dice que Marte y la Tierra compartieron rasgos comunes en sus primeros cientos de millones de años. La existencia de antiguos cauces y lodazales sugiere que el agua fluyó alguna vez por el planeta rojo. Este hecho da a entender que Marte estuvo rodeado por una atmósfera templada de dióxido de carbono.

La nave espacial *Viking*, que se posó sobre ese planeta en los años setenta, no encontró restos de vida. No obstante, según McKay, la posibilidad de hallar indicios positivos, en forma fósil o viva, en una futura misión, ha aumentado con el descubrimiento de formas microbianas en lugares insospechados de la Tierra. McKay y otros han observado densos mantos microbianos en el fondo de lagos permanentemente helados de la Antártida, cuyo clima glacial y seco se parece al de Marte. Se han encontrado también bacterias en rocas sedimentarias y depósitos de petróleo a miles de metros de profundidad, en depósitos salinos y, por supuesto, en humeros profundos.

Según McKay, Marte es el sitio ideal para buscar fósiles. "Está congelado desde hace cuatro mil millones de años. Y no tiene placas tectónicas. Compendia el sueño de todo paleontólogo." Reconoce, sin embargo, que le falta una de las características potencialmente significativa de la Tierra: una gran luna. "Si se acepta que la vida evolucionó en masas de agua sometidas a la acción de las mareas, falla la analogía con Marte". McKay opina que el descubrimiento de vida extraterrestre daría un nuevo impulso a las investigaciones sobre el origen de la vida, como ocurrió en 1965 con el de la radiación de fondo de microondas, que vino a legitimar los estudios cosmológicos. "Necesitamos una base de conocimientos similar a la proporcionada por la radiación de fondo de microondas, para hacernos respetar."

Miller, quien después de más de tres décadas continúa aún en la brecha tras el misterio de la vida, coincide en que el campo necesita un descubrimiento espectacular, para acabar con la imaginación desbocada. Pero es de los que piensa que tal descubrimiento saldrá de los laboratorios que buscan la respuesta en la Tierra. Lo que hace falta ahora, comenta, es menos teorías e inquisiciones extraterrestres y más experimentos. "Se me ocurren una docena de ideas al día, y las rechazo todas."

¿Ha considerado alguna vez la posibilidad de que la génesis de vida fuese un milagro, no reproducible por el hombre? Nunca, contesta Miller. "Creo más bien que no hemos dado todavía con el truco correcto", agrega. "Cuando encontremos la respuesta, será tan condenadamente simple, que todos nos preguntaremos ¿cómo no se me ocurrió antes?"

Juegos matemáticos

La verdadera historia de cómo acertó Teseo a salir del laberinto

Ian Stewart

Teseo había doblado solamente cinco esquinas del laberinto cuando llegó al cabo de su cuerda. "¡Maldita sea! ¿Por qué no me daría Ariadna un hilo más largo?", rezongó. Arrojó con petulancia el carrete al suelo. ¿Se atrevería a retroceder y encarar el escarnio del rey Minos y de los ciudadanos de Creta?

Los héroes jamás vuelven la espalda, pensó. Desenvainó la espada y avanzó intrépido, alerta y prestos los sentidos al primer signo del terrible Minotauro. Al sentir una vaharada de índole bastante bovina, Teseo supo que se iba encaminando en la dirección correcta. Siguió el aroma vacuno, adentrándose cada vez más en el laberinto. Se esforzó en recordar por dónde iba pasando, pero todos los túneles parecían iguales. Pronto se percató de que estaba perdido sin remedio.

Al pasar por un corredor oyó un bufido acompañado de una especie de regurgitación. Se dirigió hacia el sonido y tropezó directamente con una pared suave, tibia, ¡móvil! ¡Por Zeus tonante, era el Minotauro!

Teseo blandió su espada con gallardía, pero sin destreza. Falló al atacar la bestia y golpeó un muro de piedra con tanta violencia que la espada se le escapó de las manos.

"¡Tira de una vez ese pincho estúpido, no vayas a hacerte daño!", rugió el Minotauro.

"¡No voy a rendirme, hijo de cabestro! ¡Yo, Teseo, vengaré la muerte de todos los jóvenes y doncellas que ha devorado!"

"¡Jamás me he comido a nadie! ¿Acaso ignoras que los toros son vegetarianos? Todos esos jóvenes y doncellas se encuentran todavía errando por el Laberinto. Tampoco ellos pueden encontrar la salida."

A decir verdad, este Minotauro no parecía en forma alguna una fiera sedienta de sangre. Su estampa recordaba una vaca de engorde con cuernos. "Teseo, muchacho, ¿por qué no te lo tomas con calma? Vas a estar atascado en este laberinto durante largo tiempo. A lo mejor puedes ayudarme a resolver un problema que me tiene frito."

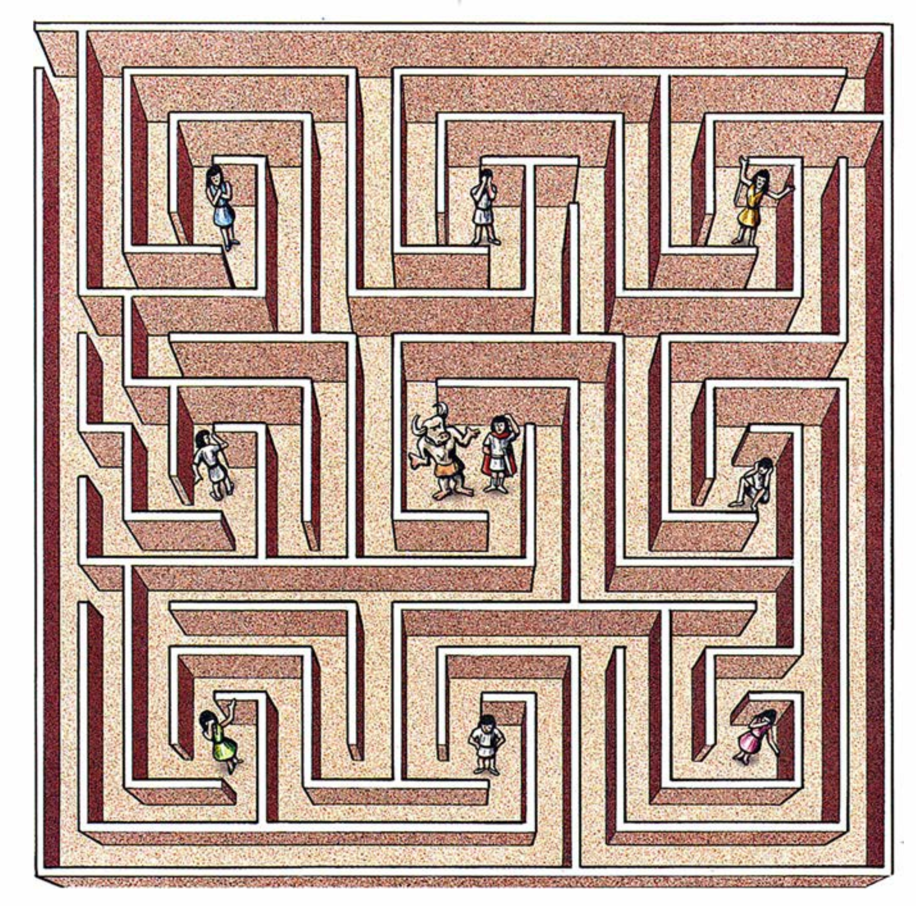
"¡El único problema que me interesa es cómo salir de este dédalo!", replicó Teseo.

"Bueno, si hubieras tenido la precaución de traerte un plano", dijo el Minotauro, "podríamos resolver el dédalo bloqueando todos las vías sin salida."

"¿Y dónde supone que podría haber encontrado ese plano?", cortó Teseo con indignación. "¿Qué cree, que cuando Dédalo acabó de construir este lugar fue corriendo a archivar una copia de los planos en el Registro de la Propiedad Cretense? Pues no, los destruyó. ¿No tiene otra brillante idea?"

"Verás, podríamos intentar el truco de ir rozando la pared con la pezuña izquierda —la mano izquierda, vaya— sin despegarla del muro. Si tras entrar, se mantiene el contacto permanentemente, está garantizado que se acabará por volver a encontrar la vía de salida."

"Gracias por la indicación", replicó Teseo reconocido. Salió disparado laberinto adelante, rozando la pared



¿Podrán Teseo y el Minotauro encontrar a todos los donceles y doncellas sin pasar más de una vez por ningún corredor ni bifurcación?

con la mano izquierda, en busca de la salida.

Tres días después reapareció Teseo, exhausto. "Sabía que volverías", admitió el Minotauro. "He probado el método de la pata en la pared una docena de veces. Como ya te advertí, el método sólo tiene garantías de éxito si se utiliza desde el punto de entrada. Si empezamos a usarlo desde algún lugar del interior, solamente está asegurado el retorno a ese lugar. Pues lo único que se hace es recorrer un sistema conexo completo de paredes y si ese sistema no está conectado con la entrada, te lleva desde la nada hasta ningún sitio."

"¡Ya podía habérmelo dicho hace tres días!"

"No quería desanimarte. La verdad es que no creo que salgamos nunca de aquí. Verás: si tú, yo y todos los demás que están atrapados lográramos escapar, se levantaría un auténtico escándalo. El rey Minos tendría que explicar a los cretenses por qué nos había encarcelado. ¿Crees que puede dejar que el periodista ése, Homero, vaya contando toda la historia en la prensa sensacionalista? ¡De ninguna manera! Minos, como buen político, haría lo imposible por echar tierra a la historia. En cuanto escapásemos, podría decidirse a sacrificarnos a los dioses."

"Prefiero con mucho luchar contra el rey Minos que languidecer en estas paredes por toda la eternidad", proclamó Teseo con bravura. "Tiene que haber una forma de salir de este embrollo."

"Mientras te dedicas a planear nuestra gran fuga, Teseo, quizá tengas tiempo para resolver un acertijo que acabo de inventar. Un eunuco, una ninfa, un cíclope y un sátiro quieren cruzar la laguna Estigia. Encuentran una barquilla capaz de transportar a dos de ellos como máximo. El único capaz de remar es el eunuco. El cíclope no puede quedar a solas con la ninfa, pues la devoraría. Tampoco se puede dejar solos al sátiro con la ninfa, porque... bueno, no entremos en detalles. ¿Cómo puede hacer el eunuco para transbordarlos a todos sanos y salvos?"

"No me fastidie ahora con eso", se quejó Teseo. "¿No sabe nada más sobre laberintos?"

El Minotauro se rascó un cuerno con la pezuña. "Verás, lo más importante de un laberinto es la forma en que se conectan sus conductos y ramificaciones. Las longitudes de los túneles importan poco."

"Me parece que no voy a estar de acuerdo con eso", replicó Teseo, acariciándose las ampollas que se había hecho en los pies.

"Habrás de conceder que las longitudes de los túneles no afectan a la ruta que conduce a la salida, ¿correcto? Así pues, hay que hablar de las propiedades topológicas del laberinto, no de las propiedades métricas. Ahora bien, para representar los aspectos topológicos fundamentales, convendrá utilizar un grafo. Los nodos del grafo corresponden a las bifurcaciones del laberinto; los lados del grafo representan túneles. El problema de salir de un laberinto —o de hallar un lugar determinado de él— se convierte en el de recorrer un grafo desde un nodo a otro. Un teorema clave de la teoría de grafos nos permite transformar un problema de laberintos en un problema sobre grafos."

"¡Fantástico!", exclamó Teseo. "Por fin estamos llegando a algo. Me encantan los teoremas. Pitágoras me contó en cierta ocasión uno impresionante; algo sobre una medusa con hipo y unos cuadros de dos paletos."

"No es el momento, Teseo. Concentrémonos sobre el teorema del laberinto. Dos nodos pueden conectarse por un camino continuo si y solamente si se hallan en una misma componente conexa del grafo."

"Hum...", murmuró Teseo, dubitativo. "¿Qué es una componente conexa?"

"Es el conjunto de todos los nodos alcanzables desde un nodo dado mediante un camino continuo", recitó ufano el Minotauro.

"¡Ah! Veamos si lo he entendido bien. Lo que me está diciendo es que dos nodos pueden enlazarse por un

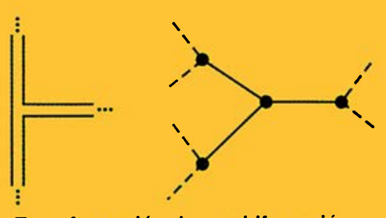
LA EXPLORACION PREVIA EN PROFUNDIDAD Y LOS LABERINTOS

El algoritmo de exploración previa en profundidad permite resolver cualquier laberinto, con tal de que se lleve registro de cada giro. La idea que lo inspira consiste en dar máxima prioridad a la penetración en el dédalo. Para simplificar la aplicación del algoritmo, es preciso convertir primero el laberinto en un grafo compuesto por ramificaciones triples, como vemos a la derecha.

El algoritmo de búsqueda en profundidad visita todos los nodos que forman parte de la misma componente conexa que el nodo de partida. Puede darse por concluido cuando atina en un nodo "meta", la salida del laberinto. El algoritmo comienza como sigue:

1. Se parte de un nodo cualquiera.
2. Se visita cualquier nodo adyacente sin visitar todavía.
3. Repítase el paso 2 hasta alejarse lo posible.
4. Si todos los nodos adyacentes ya se han visitado, se retrocede por la secuencia de nodos visitados hasta hallar un nodo contiguo a uno sin visitar; se visita ese nodo.
5. Se elimina del grafo todo lado por el que se haya retrocedido.
6. Se repiten los pasos 2 a 5 hasta retornar al nodo de partida y no dejar nodos adyacentes por visitar.

El algoritmo nos lleva a la totalidad de los nodos integrados en la componente conexa del grafo que contiene al nodo de partida elegido. El algoritmo es eficiente: el número de pasos es, a lo sumo, doble del número de lados de que se compone el grafo.



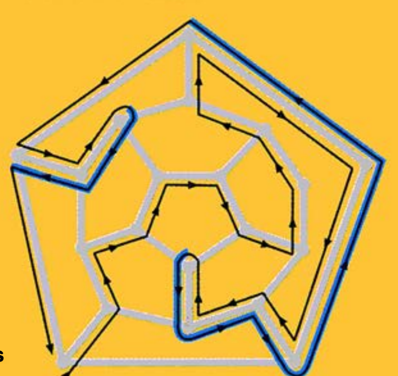
Transformación de una bifurcación en un grafo



Eliminación de esquinas y vías sin salida



Sustitución de nudos múltiples por enlaces triples



Exploración en profundidad de un grafo. Las líneas azules indican retrogradaciones

camino continuo si y solamente si existe un camino continuo que los une?"

El Minotauro se sintió agraviado. "Vaya, podríamos decirlo así, claro, pero me parece que estás trivializando una noción importante."

"Tal vez tenga razón. Pero me parece que necesitamos algo menos existencial y más constructivo."

"Perfectamente. Lo que tú quieres es un algoritmo para abrirse paso por laberintos cualesquiera."

"¿Un algo... qué? ¿Se refiere al infame Algoritmos Laberinthous, monstruo de nueve cabezas de colmillos cortantes como hojas de afeitar y cuyos cabellos son serpientes?"

"No, Teseo, un algoritmo no es una bestia. No es más que un vocablo que va a derivarse del nombre de un matemático del siglo IX, Muhammad ibn Musa abu Abdallah al-Khorezmi al-Madjusi al-Qutrubilli. El nombre 'Al- Khorezmi' se convirtió primero en 'al-Gorizmi', en 'algorismo' después y por fin en 'algoritmo'. Esta voz se utiliza hoy para describir algún procedimiento específico; por ejemplo, un programa de ordenador."

"¿Qué es un programa de ordenador?"

"Nada que te importe. En 1892, M. Trémaux inventará un algoritmo para atravesar un laberinto. Ese algoritmo volverá a redescubrirse, casi un siglo después, por J. Hopcroft y R. Tarjan, en el contexto de la teoría de grafos, la cual, como ya he dicho, es muy similar a la teoría de laberintos. El algoritmo laberíntico se denomina exploración previa en profundidad. El algoritmo de exploración en profundidad resulta especialmente adecuado para la resolución de laberintos, por-

LA EXPLORACION PREVIA EN PROFUNDIDAD EN CIERTOS PROBLEMAS

La búsqueda en profundidad proporciona un potente método de resolución de problemas en los que el traslado de personas, animales u objetos desde una posición inicial a una posición final seleccionada ha de obedecer a ciertas reglas. No obstante, el algoritmo de exploración en profundidad sólo funcionará si el número de posiciones posibles es finito. El algoritmo adopta la forma siguiente:

1. Siempre que se llegue por primera vez a una posición nueva (incluida la posición inicial al comienzo del problema), enumérense todas las posiciones alcanzables desde ella.

2. Desde la posición inicial, se elige al azar y se efectúa después cualquier movimiento que conduzca a una posición "nueva" (una situación que no se haya presentado ya).

3. Repítanse los pasos 1 y 2 tan lejos cuanto sea posible.

4. Si todos los movimientos conducen a posiciones "antiguas", se retrocede por la secuencia de movimientos ya efectuados hasta hallar una posición desde la cual se pueda alcanzar una "nueva". Se efectúa entonces ese movimiento.

5. Se desprecia a partir de aquí todo movimiento por el que se haya retrocedido.

6. Repítanse los pasos 1 a 5 hasta que se alcanza la posición deseada o hasta que, habiendo agotado todas las posibilidades, se retorna a la posición de partida. En este caso, el problema es insoluble.

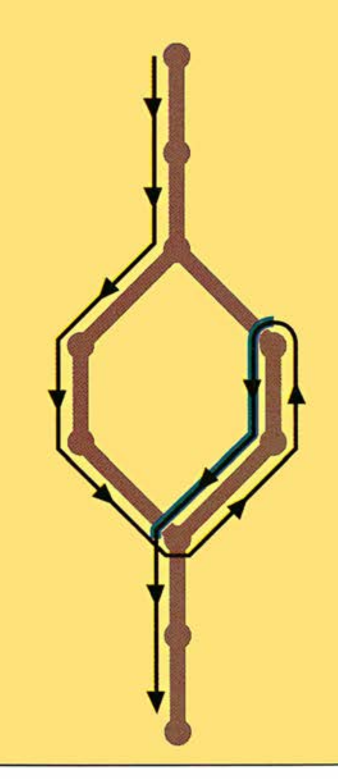
El algoritmo de exploración previa en profundidad es aplicable al problema del eunuco. Un eunuco, una ninfa, un cíclope y un sátiro han de cruzar en barca la laguna Estigia. Sólo el eunuco puede remar; en la barca sólo hay sitio para otro pasajero. Ni el sátiro ni el cíclope pueden quedar a solas con la ninfa.

Podemos representar a los participantes por E (eunuco), C (cíclope), N (ninfa), S (sátiro). El símbolo || indica la laguna Estigia. Por ejemplo, el código [EN||CS] indica que el eunuco y la ninfa se encuentran en la ribera izquierda y que el cíclope y el sátiro están en la derecha. El algoritmo de exploración previa en profundidad resuelve el problema del eunuco como muestra la tabla.

El algoritmo da un "giro en falso" en el paso 6, pero lo corrige con éxito por retrogradación. La solución del rompecabezas del eunuco es equivalente a la solución del laberinto que consideramos.

Debe subrayarse que el algoritmo no precisa el trazado previo de este grafo. Se van explorando las secciones que van siendo necesarias.

POSICION ACTUAL	MOVIMIENTOS POSIBLES	COMENTARIOS	MOVIMIENTO
[ECNS||-]	[CS||EN]	posición inicial	[CS||EN]
[CS||EN]	[ECNS||-] [ECS||N]	posición antigua impuesta por el algoritmo	[ECS||N]
[ECS||N]	[CS||EN] [C||ENS] [S||ECN]	posición antigua elegida al azar entre las posibles otra jugada posible	[C||ENS]
[C||ENS]	[ECS||N] [ECN||S]	posición antigua impuesta por el algoritmo	[ECN||S]
[ECN||S]	[C||ENS] [N||ECS]	posición antigua impuesta por el algoritmo	[N||ECS]
[N||ECS]	[ECN||S] [ESN||C] [EN||CS]	posición antigua elección al azar (mala jugada, pero muestra cómo lo resuelve el algoritmo) (otra posible elección)	[ESN||C]
[ESN||C]	[N||ECS] [S||ECN]	posición antigua impuesta por el algoritmo	[S||ECN]
[S||ECN]	[ECS||N] [S||ECN]	posición antigua posición antigua	retroceso al paso 7
[ESN||C]	[N||ECS] [S||ECN]	posición antigua posición antigua	retroceso al paso 6
[N||ECS]	[ECN||S] [ESN||C] [EN||CS]	posición antigua posición antigua impuesta por el algoritmo	[EN||CS]
[EN||CS]	[N||ECS] [-||ECNS]	posición antigua impuesta por el algoritmo	[-||ECNS]



que es posible aplicarlo sin tener un mapa. Requiere sólo la aplicación de reglas locales en los nodos e ir tomando nota de los nodos y lados ya visitados. Aunque nos encontramos atrapados en el laberinto, el algoritmo nos facilita el camino de salida."

"¡Brillante!", gritó Teseo. "¡Esa idea nos va a asegurar la libertad! Lo único que hemos de hacer es una exploración previa en profundidad del laberinto!"

Pero el Minotauro no parecía impresionado. Después añadió: "Lo malo es, Teseo, que necesitamos alguna forma de ir señalando cada cruce, de manera que sepamos dónde hemos estado antes y de dónde hemos venido. ¿No te habrá puesto Ariadna por casualidad una barra de tiza en la fiambrera del almuerzo?"

Teseo lamentó que en su equipo se hubiera omitido poner tiza. "Pero tengo una espada. Haremos rayas en las paredes."

"No hay nada que hacer. Estas paredes son tan duras como el diamante."

"¡Maldita sea...!"

Se sentaron en silencio, sumidos cada cual en sus pensamientos. Al cabo, el Minotauro enderezó la espalda. "Oye, acaba de ocurrírseme una idea."

"¡Pues tenga cuidado, no le dé dolor de cabeza!", se mofó Teseo. "¿Servirá para sacarnos de aquí?"

"No. Es una idea sobre el problema del eunuco."

"¡Ah, eso!", dijo Teseo con desdén.

"Verás, acabo de darme cuenta de que mi problema —y otros muchos similares— es, en realidad, un problema de recorrido de laberintos disfrazado."

"¿Quiere decir que la barca de los infiernos tiene que atravesar un laberinto?", preguntó Teseo. "Esa noticia no le hará gracia a Caronte."

"No, no se trata de un laberinto de pasadizos y bifurcaciones, sino de un laberinto lógico."

"Minotauro, no entiendo ni media torta de lo que me está diciendo."

El Minotauro trató de explicárselo. Cada una de las posibles posiciones del rompecabezas del laberinto puede considerarse como un nodo de un grafo; cada movimiento desde una posición a otra, un lado que une los correspondientes nodos. La idea del Minotauro consistía en utilizar el algoritmo de búsqueda previa en profundidad para recorrer el grafo. Después, por eliminación y retrogradación, se tendría una solución del rompecabezas.

"Me imagino que ha inventado el algoritmo MEMIRUPRO (Método Minotauro de Resolución Universal de Problemas)", concedió Teseo, admirando la elegante solución algorítmica que el Minotauro había dado al problema del eunuco. "Pero lo que verdaderamente necesitamos es un método universal que nos saque de un laberinto cualquiera y no exija hacer marcas en las paredes del laberinto."

"No hay ninguna probabilidad", dijo el Minotauro para fastidiarle. "Nadie podría pronunciar el algoritmo MUQNSDULCYNEHMELPDL."

"Le gustan los sarcasmos, ¿verdad, mala bestia?", replicó Teseo. Pero, de pronto, se puso en pie de un salto. "Espere. Esa larga ristra de letras me ha dado una idea. Sabemos que, para cada laberinto concreto, existe siempre una secuencia finita de giros a izquierda y derecha que nos sacará de él. Pero quizás exista una sucesión de giros a izquierda y derecha que nos saque de cualquier laberinto, sea el que fuere. Una única sucesión... ¡la misma para todos los laberintos! Algo así como IIIDDIDIDDIDDDDDI... aunque prosiguiendo interminablemente. Voy a llamarla algoritmo METERUL, Método Teseo de Resolución Universal de Laberintos. ¡Lo patentaré y ganaré millones de dracmas!"

"¡Tonterías!", rezongó el Minotauro. "Para empezar, habrá nodos de los que partan más de dos posibles sendas. Y, si lo que conviene es seguir al frente, de nada servirá una mera elección entre derecha e izquierda, ¿verdad? Además, ¿qué se hace en el caso de los túneles sin salida?"

"Buena observación, sí", concedió Teseo a regañadientes. "Pero... ¡un momento! En lo de las ramificaciones múltiples y los túneles sin salida, está equivocado, Minotauro. La elección se reduciría a 'izquierda' o 'derecha', si se supone que, en cada nodo, concurren exactamente tres túneles: aquel por el que se llega y otros dos de la bifurcación."

"Pero no siempre habrá tres ramas en cada nodo", se empeñó el Minotauro.

"Ah, pero yo puedo reducir cualquier grafo (y, por consiguiente, cualquier laberinto) a un grafo que sólo posea nodos triples. Para eso, basta reemplazar cada nodo múltiple por un anillo de nodos triples interconectados. A cada callejón sin salida puedo añadirle un bucle cerrado. Y, si hay una bifurcación ficticia, en la que concurren exclusivamente dos lados, la elimino. De esta forma, dado un grafo cualquiera, puedo engendrar un grafo modificado que contenga únicamente enlaces triples. Si logro recorrer el grafo modificado, podré reconstruir sin dificultad el grafo original contrayendo a un punto cada elemento añadido por mí."

Así fue como Teseo se libró de la objeción del Minotauro. Pero todavía le faltaba por vencer una pequeña dificultad: hallar una secuencia universal de giros a izquierda y derecha que resolviese cualquier laberinto. Tras alguna reflexión, Teseo sugirió: "Supongamos que produzco una lista de todos los laberintos posibles que contienen solamente enlaces triples."

"¡Muy larga tendrá que ser esa lista", dijo el Minotauro, sin ninguna convicción.

"¡Infinita! Pero sólo necesito esa lista en teoría, mi bicorne amigo. Tiene que haber un método para formarla: partir del laberinto más sencillo e ir construyendo a partir de él otros más complicados, de todas las formas posibles."

"¡Eso es! ¡Eso es!", exclamó el Minotauro con ojos centelleantes. "¡Ahora empiezo a verlo! Primero construyes una lista de todos los laberintos —es decir, los grafos— de dos nodos, después, la lista de los que tengan tres, después, los de cuatro... y así sucesivamente, contando solamente los grafos que tengan nodos triples, claro está. Y luego formas una ristra con todas las listas, una detrás de otra."

Teseo se preguntó si ello sería posible. "¿Y no podría ocurrir que hubiera una infinidad de distintos grafos que tuviera igual número de nodos? En tal caso, su lista se alarga hasta el infinito y no hay ningún sitio 'al final' de ella donde pegar la lista siguiente."

"Sí, Teseo, pero el número de posibles grafos que poseen un número finito de vértices es siempre finito."

"¿Por qué?"

"Porque cualquier grafo de n nodos es representable por una matriz compuesta por n filas y n columnas. Se empieza por numerar los nodos de 1 a n. A continuación, si el nodo a está conectado con el nodo b, se coloca un 1 en la posición determinada por la fila a y la columna b de la matriz; de no ser así, en tal posición se coloca un 0. Una vez determinados todos los valores de cada fila y cada columna, la matriz obtenida especifica por completo la topología del grafo. El número de posibles matrices que pueden surgir de un grafo de n nodos es a lo sumo 2 elevado a n^2. Por consiguiente, el número de matrices, aunque grande, es finito."

"Exactamente", concedió Teseo. "Y si el número de matrices de incidencia es finito, el número de grafos topológicamente distintos de n nodos será menor que él y, por tanto, tam-

bién finito. Si seleccionamos sólo los grafos que tengan nodos triples, el número de grafos será todavía más finito... si entiende lo que quiero decir."

"Así es. Me parece que sí, que hemos dado con algo. Ilumíname, Teseo, para que lo vea del todo."

"Bueno, cuando haya enumerado todos los posibles grafos laberínticos como se ha explicado, mire el primero, elija en él un punto de partida y un punto de salida y determine la secuencia de giros a izquierda y derecha que llevarán hasta la salida. Esa secuencia será finita."

"Sí, pero... ¿y si se parte de algún otro punto del laberinto? ¿Y si es preciso hallar una salida diferente?"

"Aquí es donde hace falta un poco de sagacidad. Se eligen en el primer grafo una entrada y una salida diferentes, y se determina adónde nos habría conducido la secuencia anterior si no hubiéramos estado en el punto del que originalmente partimos."

Sorprendentemente, el Minotauro le interrumpió.

"Si esa secuencia te saca, espléndido; si no, añade otra secuencia que lo consiga. ¿Se continúa hallando secuencias para todas las demás combinaciones de puntos de partida y de salidas del primer laberinto?"

"Sí. Claro, es probable que haya un método más eficiente, pero éste funciona. Y cuando haya acabado con éste, pase al segundo laberinto y prolongue la secuencia para tener en cuenta todos los posibles puntos de partida y todas las posibles salidas, una tras otra; tome después el tercer laberinto, y así sucesivamente."

"La enumeración de todos esos laberintos, ¿no nos llevará un tiempo horriblemente largo, Teseo?", preguntó el Minotauro con tono de duda.

"Eso es lo mejor de todo. Podemos ir siguiendo la sucesión de giros a izquierda y derecha al mismo tiempo que elaboramos la lista. Empecemos con II. ¿Ve la salida?"

"Lo único que veo son más túneles."

"No hay problema. Déjeme ver... IDDD."

"Más túneles. Pero supongo que vamos progresando..."

"...IDDDIIDIDDIII", balbuceó Teseo, un mes más tarde.

La voz del Minotauro era tristona y desanimada. "Todavía no hay salida. ¿Qué grado de complejidad hemos alcanzado en tu lista?"

"Once cruces. Me parece que he hallado el fallo de mi método: es probable que el laberinto tenga cientos de conexiones. ¡Y entonces nunca lograríamos salir de aquí! Aunque... ¡espere! ¿Me engañan los ojos? ¡Si es mi trozo de cordel! ¡He vuelto a encontrarlo!"

Conforme iban siguiendo el hilo de Ariadna, el Minotauro murmuró, "¿Sabes? Acabo de acordarme de que un método muy eficiente para salir de un laberinto consiste en ir moviéndose al azar."

"A buenas horas mangas verdes", retrucó Teseo. "Veo luz al final del túnel."

El Minotauro felicitó a Teseo y partió hacia pastos más tiernos. El héroe se encaminó al palacio de Minos, donde Ariadna dormía. Con abrazo apasionado, la despertó. "¡Oh, Teseo, amor mío! ¡Ya sabía yo que el hilo que te di habría de salvarte!"

Libros

Manuales de mecánica cuántica y bioquímica, física del XIX, medicina hispana y biomecánica

Luis Mas, Marià Alemany, Luis Alonso, Esteban Rodríguez Ocaña y David Jou

MECÁNICA CUÁNTICA RELATIVISTA, por F. J. Yndurain. Alianza Universidad; Madrid, 1990.

A partir del modelo de la física clásica surgieron, a principios de este siglo, dos modelos por causas en principio diferentes. Al considerar grandes velocidades, es decir, velocidades comparables a la velocidad de la luz, la teoría física que más se ajusta a las observaciones es la teoría de la relatividad (especial) con su mezcla (aunque no equivalencia) de los conceptos de espacio y tiempo, su velocidad límite, precisamente la de la luz, y su equivalencia entre masa y energía, que no son más que dos aspectos de la misma magnitud física expresada en unidades distintas con el factor de conversión c^2, o sea, la repetida velocidad de la luz al cuadrado. Con todo, en sus inicios, la conversión de cierto tipo de energía a energía en forma de masa en reposo o viceversa parecía difícil de conseguir, a no ser en la pequeña intensidad que se consigue en las reacciones químicas.

Por su parte, al considerar pequeñas distancias, del orden del tamaño de los átomos, los resultados de las observaciones indujeron la aparición de la teoría cuántica, con un modelo matemático, ahora ya completamente abstracto, su principio de incertidumbre y su interpretación estadística. En los átomos hay velocidades elevadas, aunque en bastante casos no son comparables a la velocidad de la luz; por ello, en un comienzo la teoría cuántica era una mecánica cuántica con un principio de correspondencia que debía enlazarla con la mecánica de Newton. El lenguaje de la mecánica cuántica utiliza palabras idénticas a las de la mecánica clásica: potencial, hamiltoniano, energía, acción, etc.

Sin embargo, pronto se vio que deberían atacarse problemas que exigían la relación entre las dos nuevas teorías por, entre otros, los siguientes motivos: *a)* Las velocidades atómicas y nucleares podían ser en bastantes circunstancias comparables a la de la luz. *b)* Los modelos matemáticos de las correspondientes teorías físicas contenían siempre un grupo de simetría, a cada teoría su grupo, que parecía fundamental dentro del cuadro de la teoría y sus consecuencias observacionales, por lo que debería haber uno que predominase sobre los demás, debiendo las ecuaciones de la teoría más general respetar dicha simetría. *c)* Sería a nivel cuántico donde debería ponerse de manifiesto, con más facilidad, el cambio de ciertas formas de energía a masa en reposo o viceversa, fenómeno que se conoce por creación y aniquilación de partículas. *d)* En teoría clásica, cuando nos damos una fuerza y estudiamos el movimiento a través de las leyes de Newton hacemos mecánica; cuando estudiamos de dónde procede la fuerza, en la mayoría de casos introducimos un campo vectorial de fuerzas, cuyo estudio es lo que suele llamarse teoría de campos (clásica).

Aparte de esa separación u ordenamiento claro, no debe olvidarse que existen fenómenos macroscópicos sólo explicables por teoría cuántica (verbigracia, los superconductores) y fenómenos que no implican macroscópicamente grandes velocidades y que requieren para su comprensión la teoría de la relatividad (por ejemplo, la estructura del campo electromagnético).

Cuando pasamos a la física cuántica, en un primer momento dejamos la fuerza (y sus campos en su espacio-tiempo) prácticamente sin modificación. Lo que cuantificamos es todo lo concerniente a las partículas que están dentro del campo; a esto lo llamamos mecánica cuántica. Parece lógico que demos un segundo paso y nos preguntemos por cuál sería la teoría cuántica que incluyera la cuantificación de campos en su espacio-tiempo. Es decir, de una forma natural, tanto por condiciones físicas como de congruencia del modelo matemático nos vemos empujados a dar dos pasos sucesivos: *1.°* Construir una mecánica cuántica que tenga presente las grandes velocidades, es decir, hacerla relativista y con ello, por exigencia del grupo de simetría de la teoría de la relatividad, dar la debida invariancia (relativista) a las ecuaciones de la teoría. *2.°* Intentar cuantificar los campos de fuerza dentro del espacio-tiempo en que se apoya la teoría, resultando además que este paso teórico es el preciso para que puedan explicarse las observadas creaciones y aniquilaciones de partículas; lo que origina la teoría cuántica de campos.

En la práctica podemos dar el primer paso un poco antes que el segundo, porque hay un rango de velocidades en que debemos considerarlas relativistas pero no suficientes para dar un número significativo de creaciones o aniquilaciones. La diferencia entre los dos pasos es tan sutil que prácticamente no hay ningún libro de mecánica cuántica relativista (primer paso) que no incluya una introducción a la teoría cuántica de campos (segundo paso). El libro motivo de este comentario no es una excepción, y ya en el título de la cubierta interior incluye la citada introducción. En este libro puede verse que no sólo la teoría cuántica de campos es la prolongación inmediata de la mecánica cuántica relativista, sino que ésta, en según qué problemas, puede hacerse mejor, con más coherencia, como aproximación de aquélla, incluyendo en este aspecto una teoría cuántica de campos no relativista, que en general se introduce después de la relativista.

Con todo esto, lo que asombra al tomar el libro en las manos es leer la introducción, en donde sucintamente se expone que van a desarrollarse en gran parte los dos pasos aquí enunciados, y ver que el libro tiene ¡sólo 268 páginas!

Aunque hay bastantes libros sobre el particular en inglés (en las referencias del libro comentado aparecen los más importantes hasta el año 1986), no recuerdo ninguno ni en castellano ni tan corto. (El mismo autor cuando aborda la mecánica cuántica, no relativista, en otro libro de la misma colección no es tan sucinto.) Cabe preguntarse, pues, cómo se enfoca en tan pocas páginas el tema y si se consigue lo anunciado en la introducción; en definitiva, cuál es el objetivo del libro o a quién va destinado.

De entrada hay que decir que el resumen está muy bien conseguido. A partir de una introducción al grupo de simetría de las teorías relativistas, se pasa a las ecuaciones de Dirac y

Klein-Gordon con las aplicaciones más sencillas y fundamentales; sigue la presentación de la segunda cuantificación (teoría cuántica de campos), con algunas aplicaciones y el límite no-relativista; se ordena a poder introducir y justificar las reglas de Feynman para creación y aniquilación de partículas. Queda claro que algunos apartados típicos de otros libros quedan sin citar. ¡Con todo ello van un centenar de problemas, en parte resueltos o con sugerencias y cuatro apéndices!

La extensión y claridad del libro me parecen muy adecuadas al fin propuesto: *un libro de texto de segundo ciclo*. Si la mecánica cuántica relativista más teoría cuántica de campos debe darse o no dentro de un segundo ciclo o dejarse para cursos de especialización o doctorado es discutible y discutido; de todas formas, si hay que hacerlo, éste es, sin duda, el libro más adecuado que por ahora he visto.

Aunque, como estudio previo, cualquier libro de texto típico de mecánica cuántica es suficiente, aconsejaría, en orden a una mejor asimilación, que se consulte el libro ya citado de mecánica cuántica del mismo autor y ello dentro de la línea de rapidez que en el contexto del libro reseñado parece importante.

Como último comentario me gustaría indicar que el lector atento puede dedicarse con este libro, y con casi todos los libros de texto, a la caza de erratas. Si presta la debida atención cazará más de una pieza y con ello la seguridad de que empieza a comprender el tema. (L. M.)

BIOCHEMISTRY, por C. K. Mathews y K. E. van Holde. Benjamin; Redwood City, 1990.

Este magnifíco libro de texto ha sido concebido por los autores, profesores de la Universidad del estado de Oregón, ajustándose a unos criterios definidos por ellos mismos en el prólogo que podrían ser suscritos por cualquier docente de bioquímica experimentado: *1*) Una organización de la obra que empieza clásicamente con estructuras de biomoléculas, sigue con la catálisis y el metabolismo y acaba con la genética molecular, pero introduciendo aspectos de esta última a lo largo de todo el texto. *2*) El mantenimiento de un adecuado equilibrio entre aspectos químicos y biológicos, con ejemplos entresacados de ciencias afines, como la medicina o la nutrición. *3*) Cuidadas ilustraciones, de gran calidad y muy ajustadas al texto. La parte gráfica del libro es un complemento esencial del texto. *4*) El hacer hincapié en los conceptos químicos esenciales de los procesos vitales, con breves pero justificables incursiones de repaso en la química orgánica y la química física. *5*) Recordatorio de las experiencias históricas fundamentales que marcaron el desarrollo de la bioquímica actual. *6*) Un texto concebido y organizado para despertar el interés del estudiante, dejando claro nuestro desconocimiento de algunas áreas, pero organizando de modo ordenado la enorme cantidad de información de que disponemos en este campo de la ciencia.

A juzgar por los resultados, estos puntos, ciertamente ambiciosos, han sido plenamente cubiertos por los autores, que han conseguido todo eso en algo más de un millar de páginas de amplio formato. Los temas están tratados de un modo bastante uniforme en cuanto a extensión y profundidad. Sólo se observa la formación específica de los autores en biología molecular en la constante introducción de aspectos de esta materia, incluso antes de ocuparse de la estructura de los componentes de los ácidos nucleicos.

Los autores explican en uno de los capítulos introductorios el alto grado de integración existente en la actualidad entre tres áreas inicialmente separadas: biología celular, bioquímica y genética, confluyendo –según su propia definición– para dar una ciencia integrada actual, la biología molecular. Aunque el libro se titula "Bioquímica", y el contenido responde mayoritariamente a lo que conocemos por tal nombre, los planteamientos de estructura-función y el compacto desarrollo de los aspectos de genética molecular nos dan fe de la convicción de los autores en sus propios postulados, así como de la existencia de unas ciencias bioquímicas que engloban –entre otros– los tres campos citados más arriba sin solución de continuidad.

Un aspecto muy interesante es el juicioso uso de color y de convenciones gráficas no usuales en las ilustraciones; así, representan los restos ortofosfato con un rombo y utilizan el amarillo para indicar un compuesto de elevada energía (como el ATP o los citados restos fosfato). El tratamiento de las vías metabólicas se hace con rigor, de modo global y dejando siempre clara al lector la posición de la vía estudiada dentro del contexto del metabolismo general. Esto se consigue en gran medida gracias a la utilización de un esquema simplificado del metabolismo, en el que se destaca en cada caso la vía o grupo de vías que se están desarrollando.

El libro aborda la bioquímica como un todo integrado, en el que se incluyen aspectos específicos de plantas, animales y bacterias. Incorpora aspectos pocas veces explicados en los textos de bioquímica al uso, como la vía del shiquimato; en este sentido, recibe un tratamiento adecuado la fotosíntesis y su relevancia general.

Los aspectos de regulación están bien explicados al nivel inmediato de vía metabólica y también al del control génico, pero hay una importante laguna en el tratamiento del control químico, hormonal, de los sistemas funcionales. Bien es cierto que no puede pretenderse incluir en un único libro todo el saber bioquímico y el de ciencias afines, pero tal vez un desarrollo algo más extenso de los aspectos de control hubiera convertido este excelente texto en un magnífico ex-

α-D-Glucose + ATP → α-D-Glucose-6-phosphate + ADP + H^+ $\Delta G^{\circ\prime} = -16.7$ kJ/mol

Fosforilación, dependiente de ATP, de la glucosa catalizada por la enzima hexoquinasa.

ponente de lo que debe ser un manual de bioquímica. La puntillosa actualización del texto es otro elemento a destacar; así, por ejemplo, ya se introduce un apartado que trata de los ARN con actividad enzimática. Sin embargo, se echa en falta un mayor ahondamiento en el papel regulador o estructural de muchos elementos metálicos, difícil de explicar en un texto de tan cuidada organización y presentación.

La introducción de una serie de breves capítulos sobre las técnicas de la bioquímica actual es uno de los principales aciertos del libro. Las descripciones son suficientemente detalladas para que se puedan entender e incluso practicar en algunos casos. Otro aspecto que considero sobresaliente es la introducción de breves reseñas históricas y descripción de algunos experimentos clave. Esta dedicación a la didáctica se manifiesta en el amplio desarrollo de aspectos a menudo oscurecidos en otros textos, como son las precisiones sobre el significado de la K_M y las aproximaciones cinéticas de Michaelis-Menten y Briggs-Haldane.

Cuesta plantearle objeciones importantes a un libro como éste; tal vez la más grave que he observado sea la ausencia de cualquier referencia al ciclo del purín-nucleótido al tratar del metabolismo de los aminoácidos, junto con un excesivo protagonismo de la glutamatodeshidrogenasa tanto en la organización del amonio como en su mineralización.

En resumen, se trata de otro libro de texto de bioquímica que mejora los elevados niveles conseguidos por algunos de los manuales actualmente disponibles. Este es un libro de gran calidad, armónico en la imbricación de texto e ilustraciones, de agradable manejo y muy recomendable como libro base para estudiantes de bioquímica o materias afines. (M. A.)

JAMES JOULE. A BIOGRAPHY, por Donald S. L. Cardwell. Manchester University Press, 1989. **ENERGY AND EMPIRE. A BIOGRAPHICAL STUDY OF LORD KELVIN,** por Crosbie Smith y M. Norton Wise. Cambridge University Press; Cambridge, 1989.

¿Quiere el lector conocer cabalmente la física del siglo XIX? ¿Desea introducirse en el concepto de energía como nudo gordiano de la unificación de las nociones fundamentales de la disciplina? ¿Le interesa, por último, asistir al *drama* –en sentido griego clásico y mantenido por la lengua inglesa– según lo desarrollan sus dos protagonistas? Raramente va a tener otra oportunidad semejante: hágase con estas dos modélicas biografías, escritas con pericia en dos estilos muy distintos y complementarios.

Donald S. L. Cardwell es profesor emérito de historia de la ciencia en la Universidad de Manchester, autor de varios estudios sobre la física y la química de los siglos XVIII y XIX, entre ellos *From Watt to Clausius,* un clásico reimpreso recientemente por la Universidad de Iowa. Quédese con él quien no tenga tiempo de abordar los dos de cabecera (entre ambos pasan de largo las mil cien páginas); constituye buena ayuda de otro más accesible, publicado por la Real Academia Española de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales con el título de *Historia de la física en el siglo XIX*, de autoría plural. Quien respire más apurado no se irá de vacío si se detiene en el artículo, también de Cardwell, "The Origins and Consequences of Certain of J. P. Joule's Scientific Ideas", capítulo tercero de *Springs of Scientific Creativity*. (La verdad es que quien lee los doce ensayos que componen esta obra percibe muy pronto por qué se trata de uno de los libros más citados de la última década allende nuestras fronteras.)

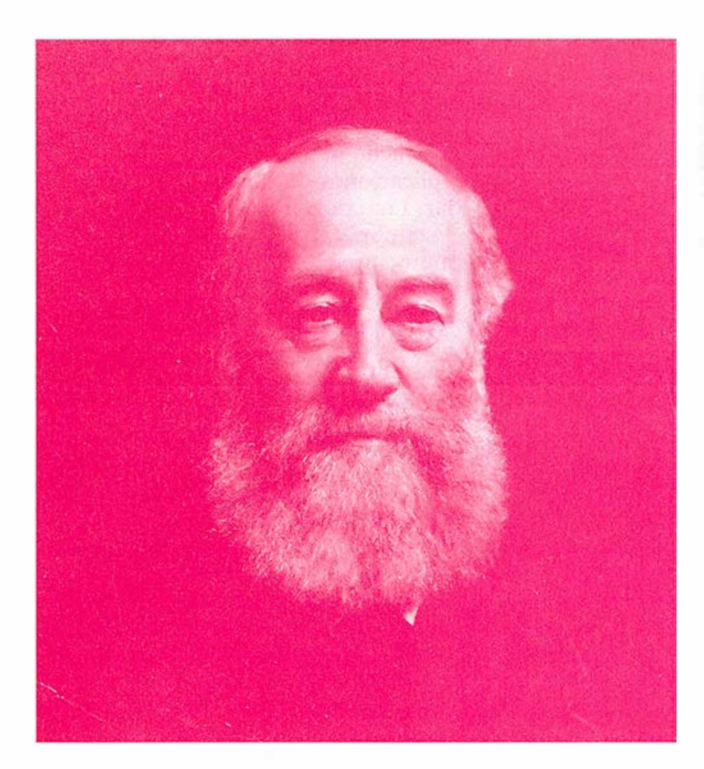
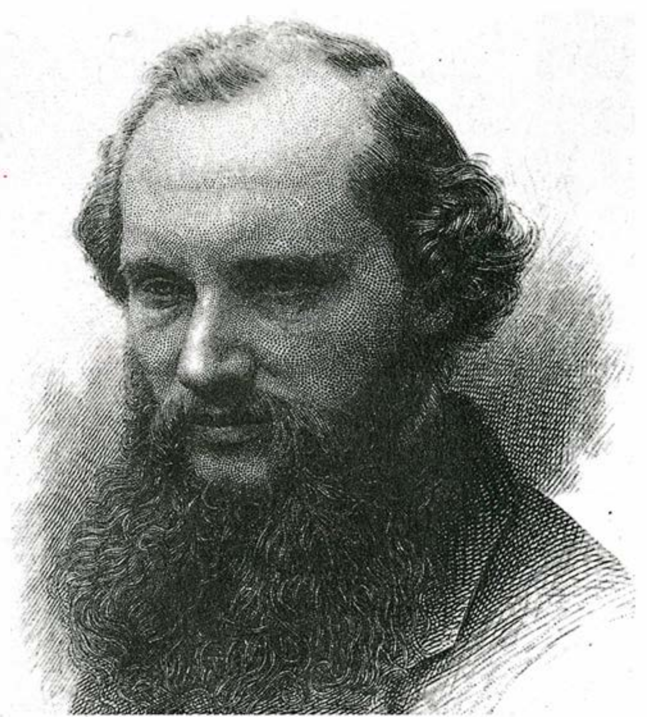
Si Cardwell es maestro de la repetición de los experimentos y de la recapitulación, Crosbie Smith y M. Norton Wise pertenecen a la escuela historiográfica sajona que avanza como la oruga mecánica sin dejar ninguna duda alzada (social, institucional, doctrinal, familiar) a propósito del personaje. Su trabajo, premiado justamente, es arqueológico *stricto sensu,* sin otras pretensiones epistemológicas foucaultianas: delimitan (definen) la zona a excavar y ahondan hasta los fundamentos; acabada una cuadrícula, pasan a la siguiente; así año tras año. Proceder que se sigue desde las páginas del prólogo: "En metodología científica, emplearemos los calificativos 'no-hipotético' y 'antimetafísico'. Lo mismo que en la esfera política y religiosa, esos términos no significan que Thomson labró una ciencia sin hipótesis y sin metafísica. La metafísica, para él, despedía el tufillo del idealismo y del conocimiento *a priori*, en tanto que a las hipótesis les faltaban lo que él entendía por pruebas empíricas directas. Su abominación de ambas fuentes de error expresaba su opinión de que, en filosofía natural, la verdad se funda en la percepción sensible directa, más que en la construcción mental." A pesar de todo, Thomson será el teórico y Joule el experimentalista.

Joule es alumno de Dalton y, para mayor ventura, goza de una cómoda posición económica que le permite dedicarse por entero a la ciencia. De carácter retraído, apenas si dio media docena de conferencias y en círculos de aficionados. Vive en un momento de transformación de Manchester, ciudad que se ha convertido en la locomotora –de vapor primero y eléctrica después– de la revolución industrial. Pero aunque lo suyo son las máquinas, no le aturde el fragor y echa su mirada inquisidora al trueno, la aurora boreal o el eco de las montañas.

Su aportación más genuina –sin entrar en el asunto de la primacía alemana con Mayer– es el descubrimiento de la equivalencia mecánica del calor. Una y otra vez refinada en su experimento sencillo en el que hacía trabajar el rozamiento de una rueda de palas en un medio fluido. Si elegante era la disposición del ensayo, no menos clara era la exposición del proceso y la conclusión extraída: "La cantidad de calor capaz de elevar un grado Fahrenheit la temperatura de una libra de agua es igual a –y puede convertirse en– una fuerza mecánica capaz de levantar, ortogonalmente y hasta un pie de altura, 838 libras." O sobre la idea conjugada de ésta, el principio de la conservación de la energía: "(No voy a perder mucho tiempo en la repetición superflua de experimentos) en cumpliéndose que los grandes agentes de la naturaleza son, por el *fiat* del Creador, indestructibles y que, doquiera se gaste una fuerza mecánica, se obtiene siempre un equivalente exacto de calor."

Con la claridad tuvo Joule otra virtud destacada, la agilidad mental para corregir cuando fuera preciso. No sólo las medidas; también los conceptos, como a propósito del origen eléctrico del calor de combustión. El lo había supuesto relacionado con las fuerzas de la afinidad química; más tarde lo atribuirá a la fuerza mecánica ejercida por los átomos en sus mutuas interacciones.

Thomson trabó conocimiento con Joule a raíz de una conferencia de éste sobre el experimento mencionado de la equivalencia mecánica. Muy pronto, ambos dejaron confundirse los planos científicos con los personales, tal era el grado de compenetración a que habían llegado. Sirva de muestra: "Si como espero tiene a bien venir al bautizo [de la hija de Joule] y ser el padrino, podríamos intentar al mismo tiempo resolver la cuestión relativa al calor y al frío que sale por una misma espita." Durante el decenio que transcurrió de 1852 a 1862 ese trabajo conjunto se hizo estrechísimo. Joule diseñaba los experimentos y realizaba las máquinas, Thomson ponía su poderosa mente y su aguda capacidad crítica. Pero no se crea que Joule era un experimentalista de vuelo raso. Brilló en el esclarecimiento

De 1852 a 1862 James Joule (izquierda) y William Thomson (derecha) trabajaron en estrecha colaboración.

sistemático y progresivo de los problemas, tendía a generalizar el resultado de la investigación hasta donde fuera posible y nadie podía presumir de mayor firmeza en la cuantificación.

Virtudes de las que no estaba exento Thomson. Quizás el lector conozca menos que, por su inamovible asimiento a los resultados experimentales, se convertiría en el más temido opositor del darwinismo de primera hora; sobre todo, porque éste empleaba un lenguaje impreciso e indefinido para aterrizar de golpe en reduccionismos químicos no probados. Este capítulo, un tanto secundario en la aportación de Thomson a la ciencia, está pormenorizadamente desarrollado en las páginas 633-645.

La debida extensión reciben, empero, la espina dorsal de su creación teórica y su obra de gobierno e institucional en general. Tras una larga primera parte en la que el lector conocerá el sistema de enseñanza de la Inglaterra de la primera mitad del XIX y la propia formación del hijo de un afamado matemático e ingeniero, se acomete el estudio de la transformación de la física newtoniana, punto por punto (cinemática, dinámica, termodinámica, magnetismo y gravedad). La tercera parte se consagra a la intervención de Thomson en la creación de la astrofísica solar en su relación con las etapas de calentamiento y enfriamiento de nuestro propio planeta. En la cuarta se describe el desarrollo de Inglaterra a través de los avances técnicos (cable submarino, en el que trabajó también Joule) y aportación de Thomson, verbigracia, en las patentes aplicadas a la navegación comercial.

William Thomson, 1824-1907, fue el nombre de familia de Lord Kelvin. A éste se le asocia con una escala absoluta, cuya expresión actual se definiría en su honor tras el desentreñamiento del concepto de conservación de la energía. (L. A.)

CIEN AÑOS DE MEDICINA VALLISOLETANA (1889-1989). COLOQUIO DE HISTORIA DE LA MEDICINA, coordinado por Anastasio Rojo Vega y Juan Riera Palmero. Valladolid; Cátedra de Historia de la Ciencia, 1989.

Diecinueve trabajos reúne este volumen conmemorativo del primer centenario de la construcción del edificio que alberga la Facultad de Medicina de la capital castellano-leonesa, correspondientes a otras tantas comunicaciones leídas en el coloquio celebrado al efecto. Los organizadores, profesores del área de historia de la ciencia de la Universidad de Valladolid, con el apoyo de la Consejería de Cultura y Bienestar Social de la Junta de Castilla y León, convocaron a los médicos vallisoletanos en octubre de 1988 para celebrar tal acontecimiento. Y éstos son los frutos del encuentro.

Debemos estar de acuerdo con la afirmación de los coordinadores, que abren el volumen mediante una corta *Introducción*: el mejor resultado obtenido es la publicación de las actas. En efecto, conseguir la publicación es un triunfo legítimo para sus organizadores, puesto que, tantas veces, iniciativas de un interés que, al menos en teoría, sobrepasa al particular de sus participantes inmediatos permanecen en el olvido. Sin ir más lejos, de las reuniones o simposios convocados por la Sociedad Española de Historia de la Medicina desde 1987, sólo se han publicado, hasta la fecha, actas de la primera –Alicante– y de la cuarta –Granada–.

El carácter, contenido y grado de exigencia de las comunicaciones aquí recogidas es dispar; sólo las unifica el marco geográfico de los asuntos tratados (Valladolid), puesto que el ámbito cronológico en que discurre cada una es distinto, dentro del último tercio del siglo pasado y el primero de éste. Se producen tanto textos procedentes de profesionales de la historia de la medicina, como de personas de otra presumible dedicación médica, aunque, por desgracia, no se identifica a los firmantes más que con su nombre y apellidos, lo que impide más precisiones.

Aunque ni la presentación ni el sumario lo hagan, las distintas comunicaciones se pueden agrupar, por su temática, en trabajos sobre la institución (pp. 21-46), trabajos sobre profesión y asistencia (pp. 47-78), notas sobre personalidades médicas (pp. 79-104) y estudios sobre publicaciones (p. 113 a fin). Todos ellos pre-

cedidos por una lección acerca de "La Medicina en el mundo actual" de Juan Riera, exactamente la que hace el número 19 en su libro *Historia, Medicina y Sociedad* (Madrid, 1985).

Incluidos en el primer bloque se presentan cuatro trabajos de autores vinculados profesionalmente con la docencia en historia de la medicina en Valladolid (Granda, García del Carrizo, Rojo y García González), que analizan, respectivamente, las vicisitudes del proceso de construcción del centro centenario, los distintos planes de estudio en vigor hasta 1944, con especial detalle el de 1886, el profesorado de las asignaturas llamadas "auxiliares", o de ciencias, en las últimas décadas del siglo XIX y los estudios impartidos para la obtención de otros títulos sanitarios distintos al de medicina.

Trabajos acerca del que hemos denominado bloque de profesión y asistencia son los de Moro y Tejedor, Vega, Pastor, Torres y Rozúa y Molina, que se ocupan de la distribución de profesionales sanitarios en la provincia de Valladolid en 1892, de la actividad de los médicos de la beneficencia municipal domiciliaria en dicha capital, de la beneficencia provincial entre 1888 y 1912, de los bandos de contenido sanitario emitidos por el Ayuntamiento entre 1870 y 1879 y de las funciones del laboratorio central de análisis del Hospital Militar durante la guerra civil. También podemos incluir aquí la comunicación de Llorente sobre la epidemia de cólera de 1885 (pp. 105-112), aunque en el texto impreso aparece alejada de las citadas. Estos trabajos se apoyan en distintas fuentes de archivo o bibliográficas, que detallan, salvo en los dos últimos. Esta ausencia de referencia explícita a las fuentes, que afecta también a otros de los artículos que comentaremos más adelante, es una deficiencia contra pronóstico en una publicación historiográfica, que nos habla de un cierto descuido editorial, imperdonable entre profesionales.

Hablando de fuentes, en la comunicación de Vega sobre la beneficencia municipal, aprendemos que el Libro de Actas 1884-1958 de dicho cuerpo facultativo se encuentra ¡en un archivo particular! No hay duda de que el hábito de patrimonializar la función pública por quienes legítimamente la detentan –y que, en puridad, no es sino delegación– es uno de los grandes obstáculos para que este país alcance a desarrollar una correcta política de protección de las fuentes documentales administrativas.

Por lo que respecta a figuras médicas vallisoletanas, se tocan las de Alvarado (1853-1916), oftalmólogo; Laorden (*fl.* 1857-1900), cirujano; Simón Nieto (1885-1919?), antropólogo; Lecha-Marco (1888-1919), médico legista, y el ginecólogo Villa (1879-1944), por Hernández, García de Padilla, Bendito, Meer y López de Letona. Recogen aspectos concretos de su trabajo profesional o de sus conocimientos, o bien se trata de notas biográficas, como las que se identifican como procedentes de tesis doctorales.

El último bloque versa sobre publicaciones médicas. Gil escribe sobre la contribución de L. de la Peña a la sección de Urología de la *Revista de Medicina y Cirugía*; Fernández sobre *La Clínica Castellana* y Albi Romero presenta una bibliografía de textos médicos publicados en Valladolid entre 1900 y 1930. La contribución de Fernández, aunque no se expresa en el texto, es resumen de un trabajo más amplio, centrado en el estudio de la revista médica vallisoletana de mayor continuidad (1910-1930) con técnicas cuantitativas; la de Albi, el expurgo de las referencias contenidas en el *Catálogo General de la Librería española e ibero-americana,* sin más.

En conjunto, pues, se trata de una serie de trabajos que, con distinto nivel de exigencia y de profundidad y partiendo de fuentes locales, abordan un amplio abanico de problemas históricos relativos a la atención a la salud y a la vida de los profesionales que la sirvieron en torno al cambio de siglo en Valladolid, de interés para los estudiosos de la historia de la medicina en España. Lástima que los editores no hayan aplicado normas más estrictas respecto a la presentación de originales, porque una parte considerable de los trabajos carecen de aparato crítico e, incluso, de mención siquiera de sus fuentes primarias. (E. R. O.)

BIOMECHANICS OF ACTIVE MOVEMENT AND DEFORMATION OF CELLS, dirigido por N. Akkas. Springer-Verlag; Berlín, 1990.

La biomecánica es la parte de la biofísica cuyo objetivo consiste en aplicar las leyes de la mecánica a diversos fenómenos que se presentan en los seres vivos, para lograr una comprensión más profunda de las fuerzas que intervienen en los mismos y de los consumos energéticos que suponen. Hasta el momento, la biomecánica se ha aplicado preferentemente a los músculos, los huesos, las paredes de los vasos sanguíneos y de los intestinos, a la piel y a los movimientos de los animales (carrera, natación, vuelo). Estos aspectos de la biomecánica acostumbran ser bien conocidos y divulgados aunque, naturalmente, presentan muchos problemas por resolver.

Mucho más escasas han sido las aplicaciones de la biomecánica celular. Los congresos de citomecánica de Estambul (en octubre de 1986 el primero; en septiembre de 1989 el segundo, cuyas actas recoge el libro de que nos ocupamos) tienen como propósito estimular los estudios de biomecánica celular. Tanto en el prólogo como en su aportación al volumen, el profesor N. Akkas, organizador de los encuentros, proporciona una muy atractiva visión de conjunto sobre este tema.

Intentaremos perfilar algunos de los objetivos concretos de la citomecánica y situar esta ciencia en el contexto actual. Los objetos de estudio son: la membrana, el citoesqueleto, diversos aparatos celulares y las relaciones entre células. Se trata de comprender sus características mecánicas globales, de vincularlas a las propiedades de las moléculas constituyentes (tubulina, actina y miosina, fundamentalmente) y de relacionarlas con las transformaciones energéticas necesarias para que en ellos tengan lugar diversos fenómenos característicos, algunos de los cuales señalaremos luego.

Es obvia y directa la conexión entre la citomecánica y la citología, la biología celular y la histología. Por ser un físico quien lleva a cabo esta recensión, subrayaremos también las conexiones con la física. La citomecánica aparece relacionada con la ciencia de materiales, la reología, la física de medios continuos y de medios porosos: propiedades elásticas del citoesqueleto, características viscoelásticas del citoplasma, la membrana como cristal líquido... Asimismo, presenta interesantes problemas a la mecánica estadística: transiciones sol-gel en el citoplasma, polimerización y despolimerización en el citoesqueleto, fusión de membranas, dinámica de interfases... La termodinámica de no equilibrio encuentra a nivel celular una fuente riquísima de problemas, como la evaluación de los rendimientos máximos y de las estequiometrías efectivas en las transferencias energéticas y reacciones químicas acopladas, o en el uso de la segunda ley para limitar los parámetros que aparecen en las ecuaciones constitutivas de los materiales. Los diversos artículos del libro consiguen despertar en el lector un enorme interés por este nuevo aspecto de la biomecánica.

Veamos algunos de los problemas

concretos con que se enfrenta la citomecánica, sin ánimo exhaustivo. Acudamos primero a la membrana celular. Si en las teorías y modelos clásicos de la membrana ésta se considera como una bicapa lipídica atravesada por numerosas proteínas, la citomecánica completa esta visión con una zona cortical del citoplasma, vinculada directamente a la membrana. Esta zona cortical contribuye decisivamente a la resistencia mecánica y a la movilidad de la membrana celular. El papel de esta capa cortical es importante en la citocinesis, en la emisión y retracción de pseudópodos, en lamelipodios, filopodios y lobopodios, en la fagocitosis y exocitosis.

En el artículo de R. Rappaport se trata con gran detalle de las diversas teorías sobre la citocinesis; en virtud de ella, una vez agrupados los cromosomas en dos núcleos al final de la telofase mitótica, se separa la célula madre en dos células hijas. Este proceso se lleva a cabo, aparentemente, por la formación de un anillo de actina y miosina en la zona cortical. La contracción de este anillo conduce a la estrangulación que dividirá a las dos células. De otros fenómenos de movimientos de la membrana se ocupan distintos ponentes: Skalak y Zhu abordan la formación y retracción de pseudópodos, en que interviene la reología del citoplasma, la bioquímica y la energética de la polimerización, y la mecánica de medios continuos. E. Evans y M. Dembo estudian la fagocitosis; A. Pasternak, la exocitosis y los correspondientes procesos de fusión de membranas; y A. K. Harris explica diversas protrusiones superficiales que están relacionadas con el movimiento de células sobre superficies (lamelipodios, filopodios, lobopodios).

El citoesqueleto es un sistema de filamentos y microfilamentos proteínicos (principalmente de actina) y de microtúbulos de tubulina. El citoesqueleto confiere a la célula cierta rigidez transitoria y colabora en los procesos de transporte activo interno. Así, por ejemplo, el proceso de polimerización es diferente en los dos extremos de un microtúbulo: en uno de ellos (+) es rápido y en el otro (−) es lento. Algunos complejos proteínicos, como la dineína o la cinesina, presentan la propiedad de moverse a lo largo de los microtúbulos, hacia el extremo − o +, respectivamente. Por ello, al fijarse a diversas vesículas, el movimiento de tales complejos a lo largo de los microtúbulos contribuye al transporte vacuolar en el seno de la célula. Asimismo, la interacción entre la dineína y varios microtúbulos adyacentes constituye la base de la curvatura activa de los flagelos, uno de los elementos de la motilidad celular.

El interior celular contiene diversos aparatos. Uno de ellos, presente durante la reproducción, es el huso mitótico, de cuya formación y funcionamiento entiende J. R. McIntosh. La citomecánica estudia con especial interés cuáles son las fuerzas motrices y resistentes que actúan sobre los cromosomas durante la anafase, etapa en que éstos son arrastrados desde el plano central de la célula hasta los centrosomas. Las conexiones energéticas entre la despolimerización de los microtúbulos cerca del centrosoma y el arrastre de los cromosomas revisten especial interés en citomecánica.

El artículo de J. E. Mittenthal y A. G. Jacobson, el más largo del volumen, constituye el puente entre citología e histología, con el estudio de la mecánica de la morfogénesis. En efecto, las diversas tensiones mecánicas que se dan durante el crecimiento de un conjunto de células pueden conducir a inestabilidades que hagan aparecer invaginaciones, como en la gastrulación, o sinusoidades y repliegues. Así pues, el estudio de la estabilidad mecánica de estructuras pasivas (placas, esferas) no es en absoluto ajeno a la biomecánica. Naturalmente, debe tenerse en cuenta una diferencia decisiva, y es que los componentes de los tejidos son células animadas, caracterizadas por una serie de procesos irreversibles, no simples moléculas pasivas como en los sistemas mecánicos usuales. Una teoría mecánica de los tejidos debería describir las transformaciones observadas, definir las condiciones en que éstas se producen y predecir las heterogeneidades ("inhomogeneidades") en la tensión a que dan lugar, amén de los efectos de éstas sobre el número, tamaño y forma de cavidades que puedan originar en los tejidos, para comprender la producción de malformaciones congénitas.

Comentemos finalmente la inclusión en el artículo de Akkas de un manifiesto en que se resumen los puntos de acuerdo alcanzados durante el congreso acerca de los problemas abiertos de mayor interés. Se corrobora el hiato, aún demasiado grande, entre experimentos y teorías. Es indudable que esta obra contribuirá a aproximar estas dos vertientes científicas, a cubrir lagunas, a enfocar las investigaciones en algunos problemas urgentes de interés común y a crear nuevos adeptos a la citomecánica. (D. J.)

Apuntes

Los huesos, los dientes y las conchas son materiales orgánicos cuya estructura se teje con una matriz polimérica y una fase inorgánica de ordenación finísima. Combinación que asegura un delicado control del tamaño, morfología y organización de los cristales en el seno de la matriz de colágeno, enamelinas o glicoproteínas. El arte se dispone ahora a imitar la naturaleza para crear materiales inteligentes, formados por una matriz polimérica y, embebidos en ella, cristales de sulfuro de cadmio. Del éxito de ese remedo de la biomineralización va a depender el acierto en crear materiales compuestos (''composites'') con las prestaciones deseadas.

Por contrario a la intuición que nos parezca, el vacío tiene menos de nonada que de chistera de prestidigitador. En física, el vacío se caracteriza por fluctuaciones electromagnéticas omnipersistentes. Si diseñamos un micromáser, la cavidad superconductora seleccionará una frecuencia que resonará con la radiación de microondas emitida por un átomo excitado. La fluctuación del vacío estimula la radiación del átomo. Se acaba de descubrir una fuerza cuya mágica naturaleza no desdice de la fantasmagórica fluctuación, fuerza que se presentaría cuando no se acoplaran la frecuencia atómica y la frecuencia de la cavidad. Cuando el átomo pretende radiar en un modo microondulatorio incorrecto, o se le atrae hacia el centro de la cavidad o se le aleja de la misma; todo depende de parte de quién esté la frecuencia mayor.

Sí viene de dos grados. Eso es lo que han subido a lo largo de los últimos 20 años las temperaturas del aire y superficial del agua en la Zona Experimental de los Lagos de Ontario, y véase lo que ha comportado: prolongación, en más de tres semanas, de la temporada de deshielo; alteración de las propiedades biológicas, químicas y físicas del ecosistema boreal; discontinuidad en la flora, fauna y cadenas alimentarias; dificultad del sistema para renovarse a sí mismo; caída de la humedad ambiente; proliferación de incendios; crecimiento de la concentración de solutos en las aguas lacustres; demora de la renovación de las aguas, y pérdida de hábitats tradicionales.

Dentro de la biotecnología ocupa un lugar destacado el diseño de enzimas de interés industrial (subtilisina en la producción de detergentes), alimentario (aspartilproteasas para la coagulación láctea), biomédico o simplemente de investigación básica (ribonucleasas). Todo empezó, sin embargo, no hace siquiera diez años, cuando, por mutagénesis dirigida, se sustituyó un residuo de cisteína por otro de serina en la tirosil-ARt sintetasa, cambio que permitió obtener una enzima que mostraba una menor Km (constante de Michaelis) para la unión de ATP.

Un paso firme de la biología molecular: la recombinación retrovírica acontece durante la fase de síntesis de las cadenas de ADN. Los retrovirus constituyen una familia de virus cuyo material genético es de ARN y, para replicarse, necesitan volver hacia atrás, es decir, atravesar una fase intermedia de ADN. Tras infectar la célula hospedante, el ARN retrovírico se retro-transcribe en una doble cadena de ADN, que luego se integra en el cromosoma de la célula hospedante (provirus). La enzima polimerasa II de ARN transcribe el provirus y produce el ARN vírico. Pues bien, el análisis de recombinantes retrovíricos luego de una tanda de replicación ha demostrado una tasa de recombinación muy elevada, al tiempo que muy eficiente para asegurar la viabilidad y la variabilidad de las partículas víricas.

Los partidarios de conceder la propiedad humana del ingenio o la creatividad a los ordenadores acaban de encontrar un ejemplo que esgrimir. La prueba del geómetra de la Grecia clásica Pappus de que los ángulos de la base de un triángulo isósceles son siempre iguales. La construcción de la prueba directa recurre a la partición del triángulo en mitades congruentes. La argucia consiste en considerar el triángulo una imagen especular de otro triángulo y demostrar luego que ambos triángulos son congruentes. Ese ingenio de Pappus lo ha repetido un programa de ordenador ''sponte propria''.

La violencia sigue un curso circular. Están bastante bien acotadas las condiciones que favorecen la violencia física sobre los niños; suele darse entre las clases más humildes, en familias donde falta el padre o la madre o existe tirantez entre los mismos y en ambientes sujetos a tensión especial. La investigación ha dado otro paso: ¿qué ocurrirá el día de mañana con los niños maltratados? Se mostrarán exacerbadamente agresivos, en causas o látigo de lo que ellos mismos padecieron.